



Licenciatura Noturna em Física

Instituto de Física

Centro de Ciências Exatas e da Terra

UFRJ

PROJETO DE INSTRUMENTAÇÃO PARA O ENSINO

TERMOMETRIA ATRAVÉS DO COMPUTADOR

Aluno

Bernardo de Mello Medina Isidoro Lopes

Orientadores

Roberto Pimentel (CAp-UFRJ)

Carlos Eduardo M. Aguiar (IF-UFRJ)

Dezembro de 2006

RESUMO

O que acontece com a temperatura interna do congelador quando o abrimos para retirar cubos de gelo? É verdade que uma peça de carne continua cozinhando mesmo após ter sido retirada do forno? O que é o fenômeno de superresfriamento? É possível detectá-lo? Para responder a estas e outras questões de física térmica, o computador é utilizado como termômetro pela adaptação de um termistor ao circuito elétrico de um joystick, permitindo aquisição automática de dados através da porta de jogos. A construção e calibração do termômetro são descritos neste trabalho, assim como um conjunto básico de experimentos e seus resultados, tendo em vista aplicações a atividades de caráter didático. Por fim, apresentamos os resultados da aplicação deste Projeto de Instrumentação em turmas da segunda série do ensino médio do CAP-UFRJ, a cujos alunos foram propostos a montagem, a calibração e a utilização do termômetro em projetos abertos de pesquisa, sob coordenação do Professor de Física, nos anos letivos de 2005 e 2006.

SUMÁRIO

Prólogo	Pág. 4
Agradecimentos	Pág. 5
Introdução	Pág. 6
Capítulo 1. Montagem do termômetro	Pág. 8
Capítulo 2. Calibração	Pág. 18
Capítulo 3. Experimentos realizados	Pág. 25
<i>Tempo de resposta</i>	
<i>Resfriamento endotérmico da água com Cebion</i>	
<i>Martelando com força</i>	
<i>Investigando a geladeira e o congelador</i>	
<i>Refrigerante com gelo</i>	
<i>Panela de macarrão: análise da temperatura em 3 pontos</i>	
<i>Velocidade de aquecimento de um metal. Efeito picanha</i>	
<i>Convecção versus condução de calor</i>	
<i>Resfriamento do café</i>	
<i>Temperatura ambiente ao longo de 24 horas</i>	
<i>Corpo humano. Sensibilidade da pele e evaporação.</i>	
<i>Superresfriamento</i>	
<i>Efeito M'pemba</i>	
Capítulo 4. Aplicação do projeto no CAP-UFRJ	Pág. 61
Capítulo 5. Experimentos propostos e realizados pelos alunos	Pág. 68
Conclusão	Pág. 76
Apêndice: Detalhes da calibração	Pág. 78
Referências e Leituras complementares	Pág. 86
Epílogo	Pág. 87

PRÓLOGO

“No que diz respeito à educação no Brasil,
tive uma experiência muito interessante. Ensinava um grupo de alunos
que por fim se tornariam professores, uma vez que no Brasil
não havia muitas oportunidades para uma pessoa altamente treinada em ciência.

(...)

Descobri um fenômeno muito estranho:
eu fazia uma pergunta e os alunos respondiam imediatamente.
Mas, quando voltava a fazer a pergunta - o mesmo assunto e a mesma pergunta -
eles não conseguiam responder de modo nenhum!

(...)

Depois de muita investigação descobri finalmente que os estudantes
tinham decorado tudo, mas não sabiam o significado de nada. Quando ouviam
‘a luz é refletida de um meio com um índice de refração maior’,
não sabiam que significava um material como a água.
Estava tudo completamente decorado e, no entanto, nada tinha sido
traduzido para palavras com significado.”

FEYNMAN, Richard P.,
Está a brincar, Sr. Feynman!,
Retrato de um físico enquanto homem.
Lisboa: Gradiva, 1998.

AGRADEÇO E DEDICO ESTE TRABALHO...

ao amigo e orientador Beto e sua esposa Maira,

pela consistência e verdade na orientação, pela amizade e intimidade oferecidas,
pelos almoços e lanches, pelos equipamentos emprestados e pela sublocação
gratuita de seu lar para nossas reuniões;

ao amigo e orientador Carlos Eduardo,

pela sugestão do trabalho, pela compreensão pelo atraso do projeto,
pelos chopps com petiscos no Devassa e pelo entusiasmo com os resultados;

ao funcionário do Instituto de Física da UFRJ, César,

pela disposição e competência na realização das soldas mais complexas e minúsculas
do DATA-MAP, sem as quais o projeto sequer teria tido início;

ao amigo Rui Cadena Bandeira de Mello,

que construiu com destreza diversos sensores, com isolamento elétrico perfeito,
com a precisão de quem cuidava de seu próprio projeto;

à meu Pai e Tânia,

com quem divido o apartamento, agradeço pelo conforto, pela tolerância à bagunça gerada
pelos experimentos em todo canto, e pelo amor e carinho;

à minha namorada Polly,

pela revisão dos primeiros textos, ajuda com as fotografias dos experimentos
e pela compreensão e carinho nos meus tantos momentos de ausência;

à minha Mãe,

que me carregou no ventre, me deu os valores e juízo sobre o estudo e
a cultura e me ensinou a articular as palavras.

aos alunos da segunda série do CAp-UFRJ em 2005 e 2006,

primeiramente pelo envolvimento com seus trabalhos de grupo e posteriormente
com este projeto, em particular a Felipe Gomes, o Garssa,
e aos licenciandos e membros do NAF de 2006.

INTRODUÇÃO

O projeto consiste na construção, calibração e utilização de um termômetro num contexto didático e de investigação. Batizado como **Data-MAP**, tem como base a utilização de um termistor (resistência elétrica sensível à temperatura) e a porta de jogos de um microcomputador comum. Entre os objetivos didáticos do projeto estão a utilização do computador como ferramenta de trabalho, a discussão no ensino médio de conceitos físicos como resistência elétrica, condutores e semicondutores num contexto mais geral e a investigação de fenômenos térmicos, a qual se tornou possível pela abordagem experimental com o Data-MAP.



Figura 1: Porta de jogos DB-15 (15 pinos)

O princípio de funcionamento do Data-MAP está baseado no de um joystick (controlador de jogo para computador). Este último, em geral, é formado por um manche (controle direcional, analógico) e alguns botões (controles digitais). Os botões enviam sinais elétricos para o computador cada vez que os pressionamos, de tal forma que botão pressionado significa “ligado” e botão não pressionado significa “desligado”. O manche controla duas resistências elétricas variáveis, chamadas potenciômetros; uma para a direção horizontal e outra para a vertical. Conforme movemos o manche em uma determinada direção e sentido, alteramos o valor de uma dessas resistências, o que é interpretado pelo computador e transformado em ação no jogo. Portanto, a porta de jogos do computador já é, em sua própria concepção, um medidor de resistência.

Com o auxílio de um software apropriado é possível fazer o computador exibir na tela e armazenar em arquivo de dados os valores de resistência lidos. Então, se substituirmos os potenciômetros que constituem esse joystick por termistores apropriados, os valores de resistência enviados pelo joystick e lidos pelo computador passam a estar

relacionados com a temperatura ao redor do termistor. Assim, uma vez calibrado o sistema, tem-se um instrumento que mede temperatura a partir de resistência elétrica.

Há muitas vantagens na utilização de um termômetro conectado ao computador em relação aos termômetros convencionais como o clínico e o de álcool.

- Separação espacial entre a unidade termossensível ou sensor (termistor) e a unidade de leitura e armazenamento (computador);
- Permite medição em locais de difícil acesso devido ao reduzido tamanho do sensor;
- Armazenamento instantâneo dos dados no computador;
- Armazenamento de grande quantidade de dados;
- Permite a detecção de variações de temperatura muito rápidas ou muito lentas;
- Permite acompanhar a evolução temporal da temperatura;
- Permite a realização de medições simultâneas (até 3 sensores).

Ao longo dos capítulos deste texto procuramos permitir que um leitor interessado seja capaz de reproduzir cada etapa. No *capítulo 1* descrevemos a montagem básica do Data-MAP, desde a providência dos componentes até a instalação do software de aquisição de dados. No *capítulo 2* apresentamos um método simples de calibração do sensor. Uma abordagem mais aprofundada desta etapa pode ser vista no apêndice. No *capítulo 3*, apresentamos 12 experimentos interessantes realizados, incluindo breves descrições dos procedimentos experimentais adotados, rápida discussão de resultados e sugestões para aplicação e aprofundamento no ensino médio. No *capítulo 4* descrevemos e analisamos a aplicação deste trabalho na segunda série do Ensino Médio do Colégio de Aplicação da UFRJ, nos anos letivos de 2005 e 2006, assim como apresentamos alguns trabalhos propostos e realizados pelos próprios alunos.

CAPÍTULO 1

MONTAGEM DO TERMÔMETRO

Os elementos necessários para montagem do termômetro digital são:

- Um microcomputador com porta de jogos de entrada tipo DB-15;
- Um cabo extensor de joystick com conector macho DB-15;
- Termistores de valor nominal entre 10 k Ω e 100 k Ω (resistências correspondentes à temperatura ambiente $T_A=20^\circ\text{C}$), que juntos são capazes de medir entre cerca de -30°C e 110°C ;
- Alguns metros de fios elétricos do tipo paralelo da menor bitola;
- Fita isolante adesiva;
- Isolante líquido (opcional);
- Alicates ou desencapador de fios;
- Tesoura;
- Ferro de solda de 40 W (ou similar);
- Arame de solda;
- Multímetro.

O cabo extensor para joystick encontra-se à venda em lojas de informática em geral; os termistores podem ser encontrados no varejo, no Centro da cidade do Rio de Janeiro, na Rua República do Líbano (próximo à praça Tiradentes) ou lojas de eletroferragens e eletrônicos.

Também é possível procurar na internet, por exemplo em

www.add-therm.com.br

sob encomenda, para quantidades grandes. Os demais itens podem ser comprados na mesma rua ou em praticamente qualquer loja de material elétrico e eletrônico.

O microcomputador faz o papel de armazenar os dados obtidos pelo termistor (ou termistores) conectados ao cabo extensor devidamente modificado; os fios elétricos

servem de extensão para o cabo extensor do joystick (que tem somente cerca de 1,80m, em geral); o ferro de solda é fundamental para unir com mais firmeza os contatos elétricos que serão feitos. O multímetro, por sua vez, é uma ferramenta de conferência a cada passo dado, conforme ficará mais claro a seguir.

É comum se pedir ao vendedor da loja apropriada um termistor de 30 k Ω e ele lhe fornecer, por engano, desconhecimento ou má fé, um termistor de 30 Ω , de resistência mil vezes menor e definitivamente inútil para nossa aplicação, pois não será lido pela porta de jogos do computador.

Uma vez disponível o material descrito, pode-se iniciar a montagem verificando, por exemplo, se os termistores estão operacionais através de um multímetro, testando, primeiramente, se a resistência lida no visor é compatível com a que precisamos. Em seguida, deve-se verificar se a resistência varia com a temperatura a qual o termistor está submetido, ou seja, se ela aumenta quando a temperatura diminui e vice-versa. já que esta sensibilidade do termistor é a principal premissa do nosso trabalho.

Como a leitura de dados é feita pelo computador a partir da porta de jogos, é preciso um cabo que faça esta conexão até os sensores. Pode-se utilizar o próprio joystick, mas é preferível um cabo extensor de joystick, disponível em lojas de artigos para informática a baixo custo. O cabo extensor tem dois conectores DB-15: um macho, que deve-se conectar ao PC e um fêmea, que seria conectada ao macho do joystick. A fêmea não serve como conector para o projeto devendo-se, portanto, cortá-la fora com uma tesoura. Feito isso, um conjunto de 8 a 15 fios (dependendo do modelo) de cores diversas, internos ao cabo emborrachado do joystick, deve ficar exposto.

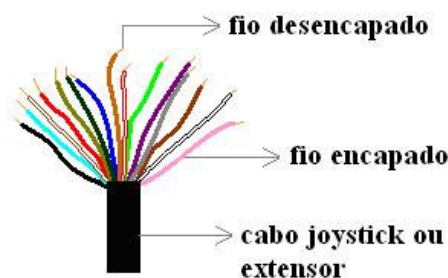


Figura 2: Os 15 fios internos ao cabo principal

A ponta macho deste cabo é conectada, então, à porta de jogos, enquanto a ponta fêmea é cortada e descartada. Há 15 fios internos ao cabo, que devem ser identificados por suas cores distintas, cujas funções podem variar de acordo com o fabricante do cabo extensor utilizado.

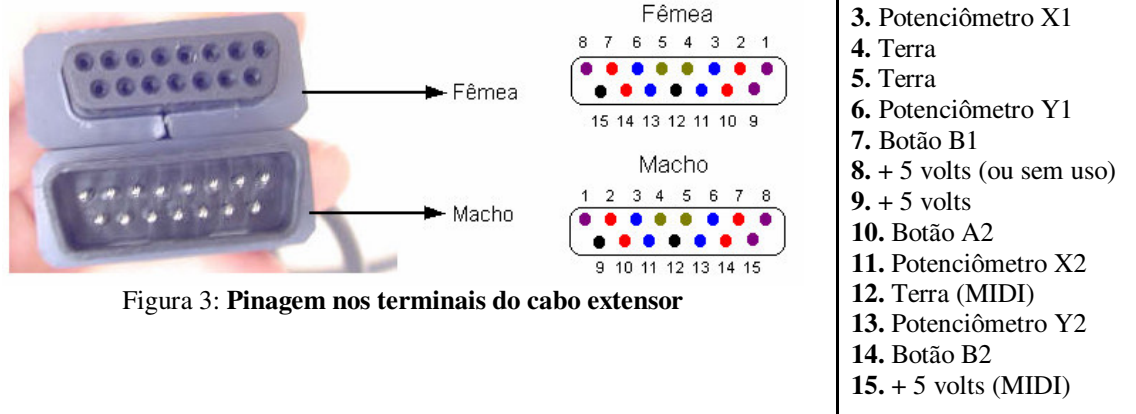


Figura 3: Pinagem nos terminais do cabo extensor

Cada um desses 15 fios conecta eletricamente as duas extremidades do cabo extensor e sua função específica (pinagem) pode ser encontrada em algumas referências como [1].

A unidade termossensível utilizada no projeto é um termistor, que é um componente eletrônico semiconductor. Os termistores utilizados aqui são constituídos de óxidos metálicos (manganês, ferro, cobalto) e caracterizados por oferecer resistência elétrica que diminui com a temperatura.

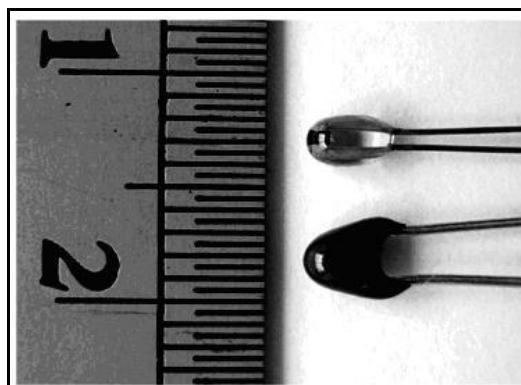


Figura 4: Dois termistores utilizados no Projeto

A montagem do Data-MAP consiste substituir os potenciômetros do joystick por termistores apropriados. Cada termistor deve ser ligado entre um pino +5 volts e um dos pinos 3, 6, 11 ou 13, interpretados pelo computador como potenciômetros (leitura de

resistência variável), conforme a tabela anterior. Para realizar estas conexões, contudo, é preciso um ferro de solda para garantir uma união consistente entre as pernas metálicas do termistor e os fios de cobre internos a cada capa colorida.

Cada fio está associado a um dos 15 pinos do conector macho DB-15 e devemos fazer um mapeamento completo dos mesmos, isto é, identificar exatamente que fio está conectado a qual pino. Para isso, há basicamente dois caminhos:

Caso seja possível, podemos abrir o conector fêmea, recém cortado do cabo extensor, com objetivo de visualizar as conexões entre os fios e os 15 orifícios que constituem este terminal, identificando pela cor qual fio está conectado a qual pino. Isso não é possível para algumas marcas de cabo extensor, por haver uma goma forte protegendo essas ligações na fêmea. Neste caso, deve-se usar um multímetro conectando uma ponta a um dos fios, identificando sua cor, e fazendo contato elétrico entre sua ponta de cobre (previamente exposta) e cada um dos 15 pinos do conector DB-15 macho. Devemos observar a resistência mostrada no visor do aparelho em cada caso.

Sabe-se que cada fio está conectado a somente um dos pinos e, portanto, quando a ponta de cobre do mesmo encostar-se a esse pino específico a resistência lida pelo multímetro deve ser nula ou praticamente nula, caracterizando um curto-circuito. Entretanto, quando se fizer contato entre essa mesma ponta de cobre e qualquer um dos outros 14 pinos, o visor do multímetro deve indicar um traço, ponto ou outro sinal indicando resistência infinita.

Quando um multímetro indicar no seu leitor apenas um ponto ou traço significa que há incapacidade de registrar a resistência elétrica entre as extremidades contactadas, uma vez que estas estão acima do fundo de escala escolhido no botão giratório. No caso da identificação dos fios aqui descrita, isto faz todo sentido, uma vez que as duas extremidades (a ponta de cobre de um dos fios e 14 dos pinos do DB-15 macho) estão separadas pelo ar, um meio de enorme constante dielétrica e que oferece, portanto, uma resistência praticamente infinita. Naturalmente, este valor está muito acima de qualquer que seja o fundo de escala selecionado no botão do aparelho. Para essa operação de teste e mapeamento recomendamos um fundo de escala abaixo de 1 k Ω .

Diferentes marcas e modelos de cabos extensores podem atribuir diferentes cores aos 15 pinos. Contudo, a função de cada pino (ou pinagem) é sempre a mesma, isto é, o pino 1 é sempre + 5 volts, o pino 2 é sempre o botão A1, etc. A seguir, ilustramos como fica o mapeamento para uma determinada marca de cabo extensor:

N	Função	Exemplo de cor
1	+ 5 volts	<i>marrom</i>
2	Botão A1	<i>vermelho</i>
3	Potenciômetro X1	<i>laranja</i>
4	Terra	<i>rosa</i>
5	Terra	<i>amarelo</i>
6	Potenciômetro Y1	<i>verde escuro</i>
7	Botão B1	<i>verde claro</i>
8	+ 5 volts (ou sem uso)	<i>azul</i>
9	+ 5 volts	<i>roxo</i>
10	Botão A2	<i>cinza</i>
11	Potenciômetro X2	<i>branco</i>
12	Terra (ou porta MIDI)	<i>preto</i>
13	Potenciômetro Y2	<i>marrom com branco</i>
14	Botão B2	<i>vermelho com branco</i>
15	+ 5 volts (porta MIDI)	<i>preto com branco</i>

Tabela 1: Mapeamento de cores

Nota: As caixinhas representam os termistores conectados aos fios corretamente.

Uma vez identificados os fios deve-se proceder com as soldas pela utilização de um ferro de solda doméstico e de arame de solda comum.



Figura 5: Ferro de solda doméstico

Para melhorar o isolamento elétrico do sistema, é recomendável cobrir com fita isolante comum ou líquida (ambas encontradas em lojas de ferragens e eletrônica) os contatos soldados. Além disso, os demais fios coloridos não utilizados também devem ser isolados eletricamente e segregados.

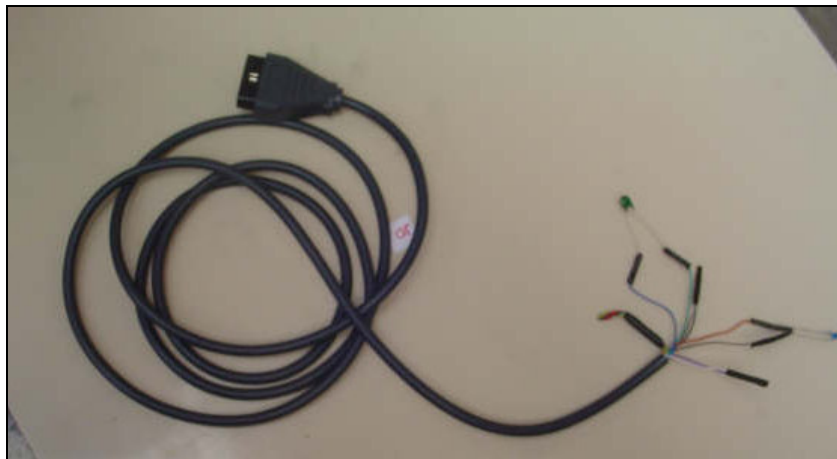


Figura 6: Cabo extensor montado e pronto (Data-MAP)

Ao final da montagem elétrica dos cabos, conexões e termistores, deve-se instalar o programa (freeware) de Aquisição de dados (AqDados V. 2.0, de Ives S. Araújo, da UFRGS) para Windows, que fará a leitura da resistência elétrica medida pelo termistor. Embora seja possível elaborar um programa em MS-DOS ou ainda utilizar outro tipo de ferramenta, recomenda-se a utilização do AqDados por sua simplicidade e disponibilidade gratuita na internet.

Sabemos que cada termistor deve estar ligado entre um potenciômetro e um pino + 5 volts, conforme já discutido, num total de até 4 termistores. A princípio, pode-se escolher trabalhar com apenas um termistor, por simplicidade e, neste caso, podemos conectá-lo a qualquer um dos pares indicados na figura anterior (1-3, 6-8, 9-11 ou 13-15). Entretanto, o software que utilizamos não permite a leitura do par 13-15.

Deve-se desencapar os fios a serem utilizados no contato com os termistores. Uma vez desencapado o par de fios escolhido para um termistor, deve-se enrolar com muito cuidado cada um deles em cada uma das pernas de metal do termistor, pois as mesmas são frágeis e podem se partir. Em seguida, pode-se soldar com arame de solda cada fio à cada perna do termistor. Depois, deve-se isolar tanto a solda quanto os contatos elétricos com fita isolante ou material apropriado, protegendo a região e isolando os contatos

elétricos recém feitos. É preciso, ainda, separar os fios que não serão usados, ainda encapados, muito bem isolados em suas pontas, um por um, e unir o conjunto com fita isolante. Os objetivos são dois: organização, evitando que haja um emaranhado ainda maior de fios coloridos e evitar que esses fios inúteis possam ter qualquer tipo de contato elétrico com os demais.

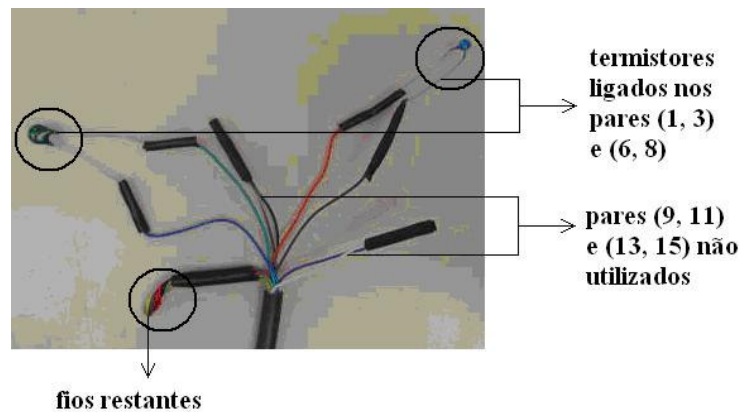


Figura 7: Detalhe do cabo extensor

Após montar o equipamento, deve-se testar sua funcionalidade plugando o terminal macho ao computador. Primeiramente, verificar no painel de controle do windows se o computador reconheceu um joystick como conectado. A configuração correta é “joystick com 4 botões e 2 eixos” e o status deve ser *OK*.

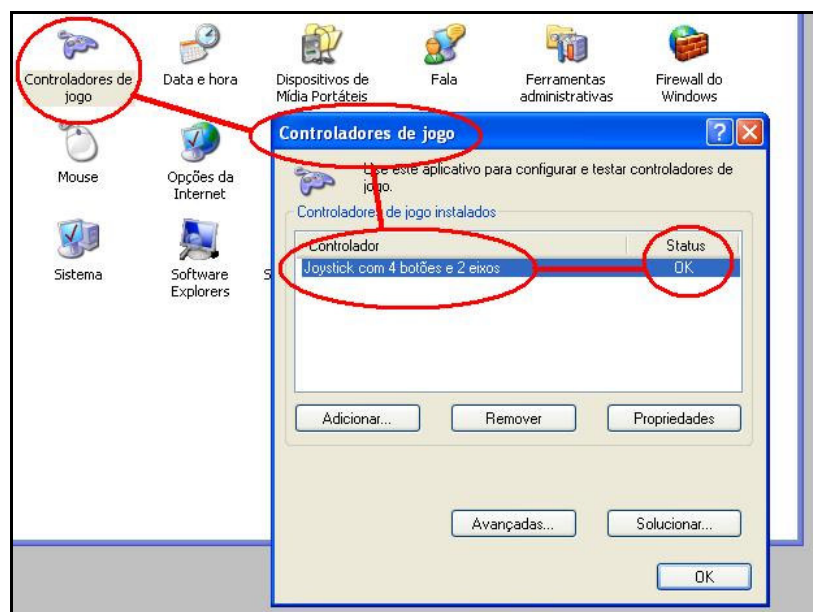


Figura 8: Configuração da porta de jogos

Em seguida, inicializar o programa de aquisição de dados e verificar se, após acionamento dos botões *analog 1, 2 e 3*, as leituras estão sendo feitas e se estão sensíveis à temperatura. Caso não haja leitura nenhuma deve-se tentar reajustar os parâmetros do joystick oferecidos pelo windows, conforme a ilustração anterior. Outras alternativas são reconectar o cabo do joystick e/ou reiniciar o computador.

O software deve mostrar os valores de resistência lidos pelo termistor (ou pelos termistores) na tela N vezes por minuto, a escolher. Se o termistor for submetido a um aumento de temperatura (caso, por exemplo, seja aproximado de uma lâmpada incandescente), o programa deve indicar diminuição instantânea dos valores de resistência. Por outro lado, se o aproximando de um copo de refrigerante com gelo (sem submergir o termistor), deve-se perceber um aumento dos valores de resistência devido à diminuição da temperatura.

Desta forma pode-se verificar a operacionalidade do instrumento, isto é: se houver resposta positiva os testes acima, ele está pronto e funcionando corretamente. Caso contrário deve-se avaliar cada passo anterior e procurar um provável erro.

Aquisição de dados com um software

O programa utilizado em nosso projeto é o Aqdados 2,0, desenvolvido por um estudante da UFRGS, Ives S. Araújo, em 2002. O programa gera um gráfico simultaneamente às medidas feitas, mostrando, assim, a resistência em função do tempo, $R(T)$.

No canto superior direito deve-se escolher em que par de fios de nosso cabo extensor está conectado nosso(s) termistor(es). O programa, por sua vez, tem capacidade para mostrar 3 leituras simultâneas, as quais chama Analog 1 (linha azul), Analog 2 (linha vermelha) e Analog 3 (linha verde), correspondentes aos pares de pinos 1-3, 6-8 e 9-11, respectivamente.

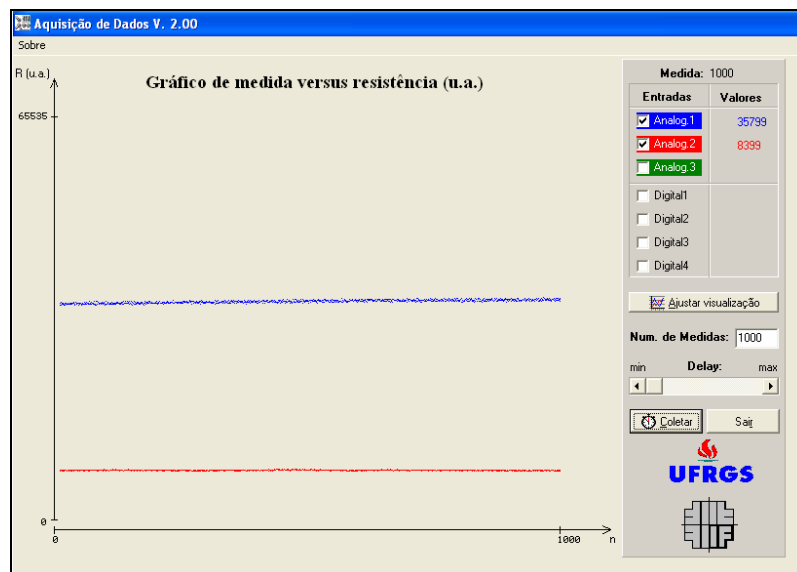


Figura 9: Tela principal do programa de aquisição

Essa característica do programa permite a visualização simultânea da evolução temporal da resistência para três sensores diferentes, bem como o armazenamento instantâneo destes dados.

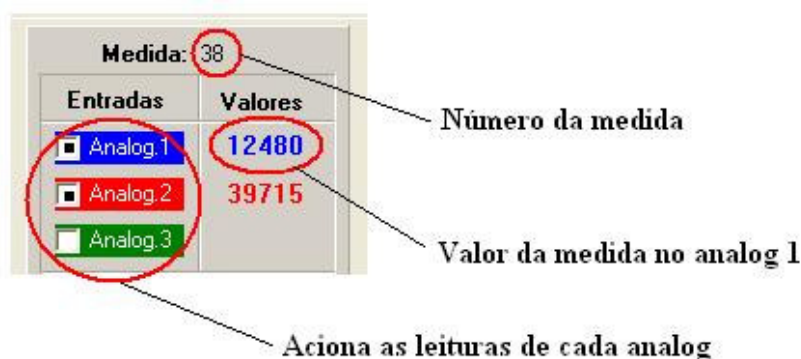


Figura 10: Mostradores do painel de controle

A frequência das medições deve ser ajustada através de dois parâmetros: o número total de medidas (100, 1.000, 10.000, etc.) que deve ser digitado e o delay (intervalo de tempo dentre duas medidas), que é regulado através de um barra de rolagem, cujo máximo corresponde a um segundo e cujo mínimo corresponde a um centésimo de segundo. Desta forma, programa tem a capacidade de medir, através da porta de jogos, de 1 a 100 valores de resistência elétrica por segundo. Inicia-se a medição pressionando o botão coletar.

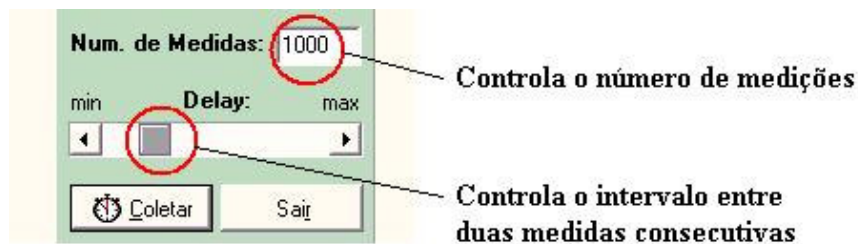


Figura 11: Ajustando os parâmetros de medição

Ao final da medição, o programa dá a opção imediata de salvar as medidas realizadas num arquivo de dados (.dat), que pode ser aberto numa planilha de dados como o *Microsoft Excel*, *Microcal Origin* ou similar, permitindo a posterior obtenção de gráficos, tratamento de dados, ajuste de curvas, etc.

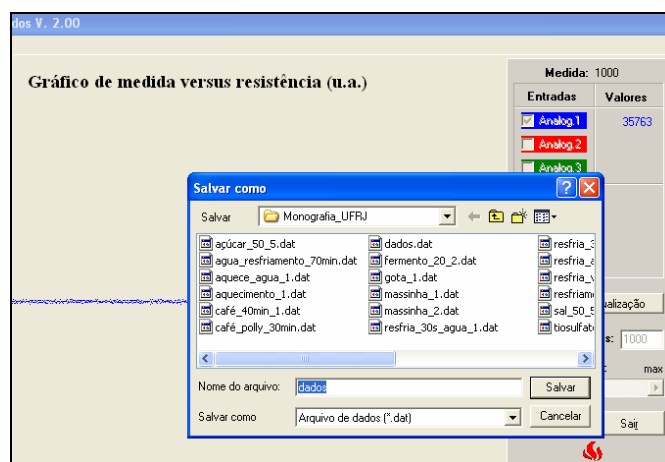


Figura 12: Janela para armazenamento de dados

Outros programas de aquisição podem ser encontrados gratuitamente na internet, e alguns destes estão disponíveis em

www.if.ufrj.br/~carlos/ensino/cap

Dependendo do objetivo de utilização deste projeto e do nível de ensino, pode-se ainda desenvolver outros programas de aquisição de dados.

CAPÍTULO 2

CALIBRAÇÃO DO TERMÔMETRO

Para que o instrumento construído com o termistor seja um termômetro de verdade é preciso transformar as leituras feitas pelo computador (através do programa de aquisição de dados), dadas em unidades de resistência elétrica, na grandeza objeto de nosso estudo: a temperatura.

Para isso, primeiramente, é preciso entender a dependência física entre essas duas grandezas. Como já foi discutido anteriormente, o termistor, o sensor que utilizamos, é um semicondutor e, portanto, oferece maior resistência elétrica à passagem de corrente quanto menor a temperatura a qual está submetido. Mais do que isso, sabe-se de outros experimentos em física térmica que o tipo de dependência matemática entre resistência elétrica e temperatura pode ser ilustrado pela curva decrescente no gráfico abaixo:

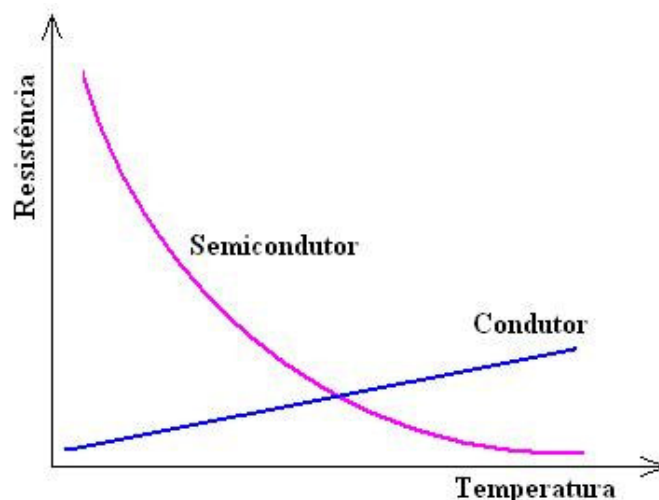


Figura 13: Condutores vs. semicondutores

A curva ascendente do gráfico anterior representa a dependência linear entre temperatura e resistência elétrica no caso de um objeto condutor, como um metal. Matematicamente, a dependência entre as duas grandezas, no caso dos termistores, embora seja altamente não-linear (vide gráfico) permite uma parametrização com uma função simples. A sensibilidade de um termistor quanto à temperatura pode variar entre cerca de $0,4 \text{ k}\Omega/^{\circ}\text{C}$ e $4 \text{ k}\Omega/^{\circ}\text{C}$ dependendo da faixa de medição, como veremos mais

adiante. Essa variação é perfeitamente mensurável tanto para um multímetro comum quanto para a porta de jogos do computador.

Nos condutores, em geral os metais, há um número grande de portadores de carga (elétrons) originalmente livres como característica do material. Neste caso, o aumento na temperatura do sistema aumenta a energia cinética das moléculas que, vibrando mais, dificultam a passagem dos elétrons viajantes, ou seja, aumenta assim a resistência à passagem de corrente elétrica.

Para os semicondutores o efeito é justamente o contrário. Elétrons livres não são característicos de certos materiais, de modo que a condutividade elétrica do material não é boa. Entretanto, quanto mais se adiciona energia ao sistema por transferência de calor, mais são arrancados elétrons das camadas mais afastadas do núcleo atômico e tais elétrons, agora livres, formam uma corrente quando submetidos a um campo elétrico, conduzindo eletricidade. Por outro lado, quanto mais baixa a temperatura, mais baixa a energia do sistema, menor o número de portadores de carga disponíveis e, conseqüentemente, maior a resistência elétrica oferecida pelo semicondutor.

Analisando as leituras de resistência do sensor já operacional para diferentes temperaturas, conhecidas a partir da utilização de um termômetro digital de conferência, percebemos que, para variações de temperatura da ordem de algumas dezenas de graus centígrados (dependendo do valor nominal do termistor), a relação entre resistência e temperatura pode ser parametrizada, com boa aproximação, pela função exponencial

$$R(T) = ae^{b/T} \quad (1)$$

e sua inversa logarítmica

$$T(R) = \frac{b}{\ln\left(\frac{R}{a}\right)} \quad (2)$$

A temperatura T é absoluta (dada em kelvin, K), assim como b , e a resistência pode ser tomada em qualquer unidade, sendo a mesma do parâmetro a . No software que utilizamos R é dado em unidades arbitrárias (u.a.).

Esta é a função escolhida por ser o mais simples possível e com o menor número de parâmetros, mas que ainda descreve de modo satisfatório a dependência entre as grandezas estudadas. Mesmo assim, sabemos que ela já pode causar problemas quando utilizada na aplicação desse projeto no ensino médio. A postura que sugerimos diante desta questão é abordada no *capítulo 4*.

Outras referências sugerem a equação de Steinhart-Hart, com mais parâmetros e ainda mais complexa para o ensino médio, como será visto também mais adiante, no apêndice 1. Em nosso projeto estudamos essa possibilidade de calibração, mas não consideramos a possibilidade de utilização real da mesma em sala de aula objetivo último de aplicação deste projeto, em função da sua aparente inviabilidade.

Para nos assegurar da confiabilidade da calibração através da função exponencial em questão, utilizamos um termistor de 100 k Ω conectado a um multímetro e registramos a variação da resistência com a temperatura entre 25 e 80°C. O método utilizado foi a imersão do termistor (devidamente isolado) numa penela com bastante água, de modo que esta fosse aquecida bem lentamente por uma chama de fogão comum.

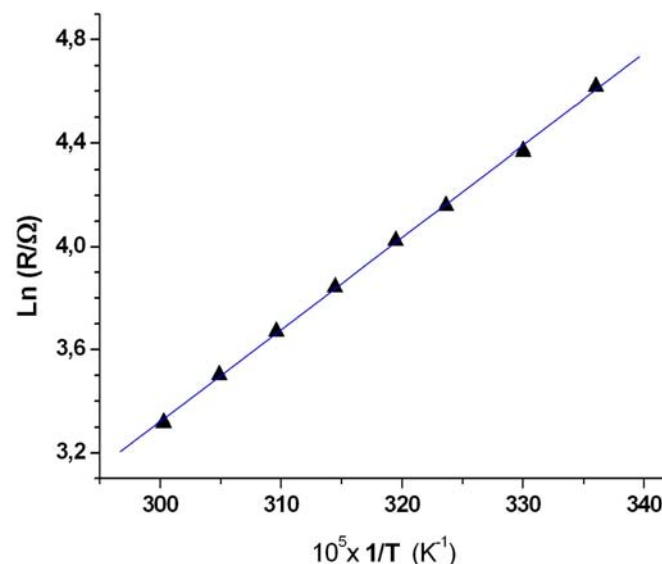


Figura 14: Dependência da resistência com a temperatura para um termistor NTC

Afim de facilitar a interpretação dos resultados, colocamos as medidas feitas num gráfico de $\ln R \times 1/T$ que, conforme a equação (2) sugere, deve apresentar uma

dependência linear. Tal linearidade, confirmada entre os pontos experimentais obtidos para a faixa de temperatura escolhida, de 25 a 80°C, o que justifica a utilização da função proposta em (1).

Procedendo com a função exponencial

A calibração do sistema segundo a função exponencial proposta pode ser feita, de modo bastante simples, pela escolha de duas temperaturas conhecidas: digamos T_1 e T_2 . Medindo-se com nosso sensor as leituras $R(T_1)$ e $R(T_2)$ associadas a estas temperaturas, obtêm-se os parâmetros a e b pela solução de um sistema algébrico simples de duas equações e duas variáveis, conforme segue:

$$\begin{aligned} R_1 &= R(T_1) = ae^{b/T_1} \\ R_2 &= R(T_2) = ae^{b/T_2} \end{aligned}$$

e daí, dividindo R_1 por R_2 , temos

$$\frac{R_1}{R_2} = e^{b\left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}\right)}$$

Tomando o logarítmo natural de ambos os lados da igualdade, vem

$$\ln\left(\frac{R_1}{R_2}\right) = b\left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}\right)$$

Colocando b em evidência, obtém-se o primeiro parâmetro

$$b = \frac{T_2 - T_1}{T_2 T_1} \ln\left(\frac{R_1}{R_2}\right)$$

E, finalmente, utilizando R_1 ou R_2 , temos o segundo parâmetro

$$a = \frac{R_1}{e^{b/T_1}} = \frac{R_2}{e^{b/T_2}}$$

Com o objetivo de dar uma maior credibilidade ao processo de calibração do termistor, segundo o método aqui proposto neste capítulo, é recomendável repetir o procedimento para diferentes pares de temperaturas T_1 e T_2 .

É recomendável a utilização de um termômetro primário como padrão para calibrar o nosso instrumento. Por exemplo, pode-se utilizar um termômetro de álcool, uma vez que o termômetro clínico possui uma faixa bastante limitada (tipicamente de 32 a 42°C) para uma boa calibração. Neste caso, a calibração é chamada de secundária e as temperaturas padrão escolhidas, T_1 e T_2 , são arbitrárias e devem estar, naturalmente, dentro da faixa operacional de cada termistor (vide gráfico abaixo). Estas temperaturas podem ser aferidas por um termômetro de comparação. Abaixo mostramos o termômetro digital de comparação que utilizamos neste trabalho.



Figura 15: **Termômetro de comparação aferindo temperatura**

As duas temperaturas escolhidas como pontos de calibração, T_1 e T_2 , também podem ser pontos físicos conhecidos, como a fusão do gelo ($T_G=0^\circ\text{C}$), a ebulição da água ($T_E=100^\circ\text{C}$) ou mesmo a temperatura de um corpo humano normal ($T_H=36,5^\circ\text{C}$) que, embora oscile alguns décimos de grau em torno deste valor, não oferece maior incerteza experimental que as demais medidas realizadas com nosso instrumento. Neste caso, em

que não se utiliza um instrumento de medição padrão como referência, a calibração realizada é dita do tipo primária.

As faixas operacionais de cada termistor, a propósito, podem variar um pouco mesmo para termistores de mesmo valor nominal. Para o termistor de 100 k Ω , é possível medir dentro da faixa de 20°C a 110°C, conforme nossos resultados mostram. Para o termistor de 30 k Ω , recomendamos uma faixa mais curta, de 5°C a 50°C e para o termistor de 10 k Ω uma faixa de temperaturas ainda mais baixas: -20°C a 30°C. Abaixo se tem as curvas características $R(T)$ determinada para os três termistores utilizados no projeto, determinadas após sucessivos processos de calibração.

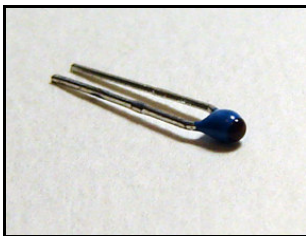


Figura 16:
Termistor de 10 k Ω

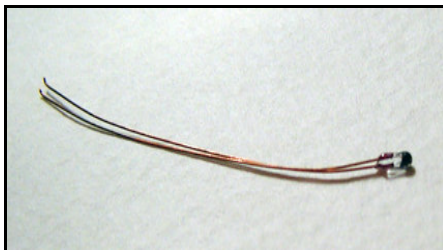


Figura 17:
Termistor de 30 k Ω

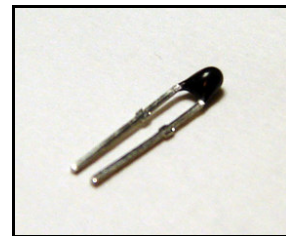


Figura 18:
Termistor de 100 k Ω

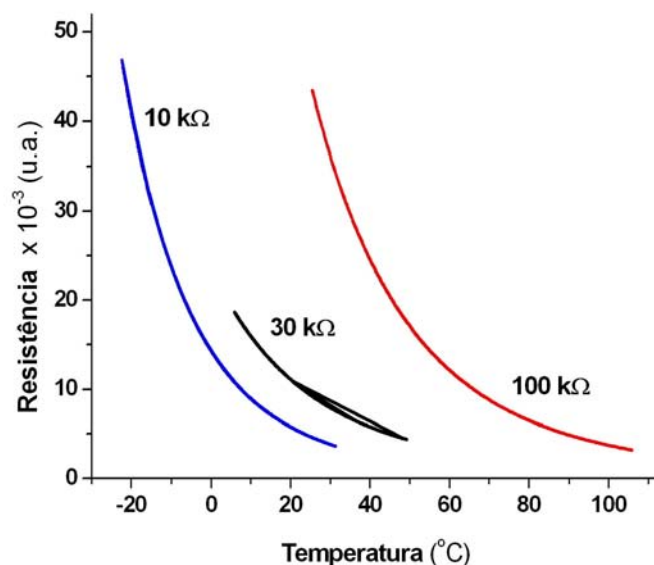


Figura 19: **Curvas características para os sensores utilizados no projeto**

Pode-se notar que a curva característica do termistor de 30 k Ω não tem mesma longitude das demais. De fato, ao tentar utilizá-lo para medir temperaturas inferiores a 5°C o valor lido pelo computador subitamente estourava o fundo de escala (cerca de

65000 u.a.). Infelizmente, porém, não sabemos o porquê deste comportamento diferenciado. Deste modo, para temperaturas mais baixas que tal valor utilizamos sempre o termistor de 10 k Ω .

Vale lembrar que a montagem experimental inclui um termistor específico, os contatos elétricos feitos e o computador utilizado. Embora o estabilizador de voltagem, se existente, e até mesmo a tensão da rede elétrica doméstica possam também influir na calibração, os consideramos como variáveis de segunda ordem.

Portanto, no caso de se utilizar um mesmo sensor já calibrado, composto de um ou mais termistores, em outro computador, é recomendável refazer a calibração. Do mesmo modo, não se pode supor que termistores de mesmo valor nominal tenham calibrações necessariamente idênticas, sob pena de se comprometer, em ambos os casos, o resultado final das medições e suas posteriores análises.

Assim, conhecidos a e b para cada montagem, utiliza-se a equação (2) para converter (através de uma planilha eletrônica de dados) cada leitura de resistência elétrica em um valor de temperatura, em qualquer escala que se desejar. Para obter T na escala Celsius, basta subtrair 273,15 da leitura em kelvin.

CAPÍTULO 3

EXPERIMENTOS REALIZADOS

As possibilidades de medida com este projeto são diversas. Aqui serão relatados alguns experimentos cujos resultados consideramos particularmente interessantes. As montagens e procedimentos experimentais são rápidos e elementares, sendo aqui descritos e, quando necessário, ilustrados. Todos os resultados são apresentados na forma de gráficos de temperatura versus tempo. A discussão dos resultados de cada experimento é abreviada, uma vez que nosso objetivo é abrir portas para futuras investigações por parte de alunos e professores interessados.

Experimento 0. Tempo de resposta.

Experimento 1. Resfriamento endotérmico da água com Cebion.

Experimento 2. Martelando com força.

Experimento 3. Investigando a geladeira e o congelador.

Experimento 4. Refrigerante com gelo.

Experimento 5. Panela de macarrão: análise da temperatura em três pontos.

Experimento 6. Velocidade de aquecimento de um metal. Efeito Picanha.

Experimento 7. Convecção versus condução de calor.

Experimento 8. Resfriamento do café.

Experimento 9. Temperatura ambiente ao longo de 24 horas.

Experimento 10. Corpo humano. Sensibilidade da pele e evaporação.

Experimento 11. Superresfriamento.

Experimento 12. Efeito Mpemba.

Experimento 0: Tempo de resposta.

Nossa primeira proposta de atividade com o termistor é a avaliação de seu tempo de resposta à variação de temperatura ao seu redor em diferentes situações. Para esta análise escolhemos dois termistores: de 30 k Ω e de 100 k Ω .

Para obter esses tempos de resposta, precisamos de três reservatórios térmicos, que consistem em copos de vidro cheios de água, cada um a uma temperatura diferente: 55°C, 25°C e 3°C. Cada temperatura foi determinada experimentalmente com auxílio de um termômetro digital.

Colocamos o sensor mergulhado num reservatório até que a temperatura se equilibre. Quando isto acontece, iniciamos a tomada de dados através do computador. Após alguns segundos, retiramos rapidamente o sensor deste reservatório e o mergulhamos num outro. Depois que a leitura de temperatura se estabilizar, aguardamos mais alguns segundos e gravamos os dados, obtendo um gráfico de temperatura x tempo para este processo.

Abaixo apresentamos sucessivamente os resultados obtidos:

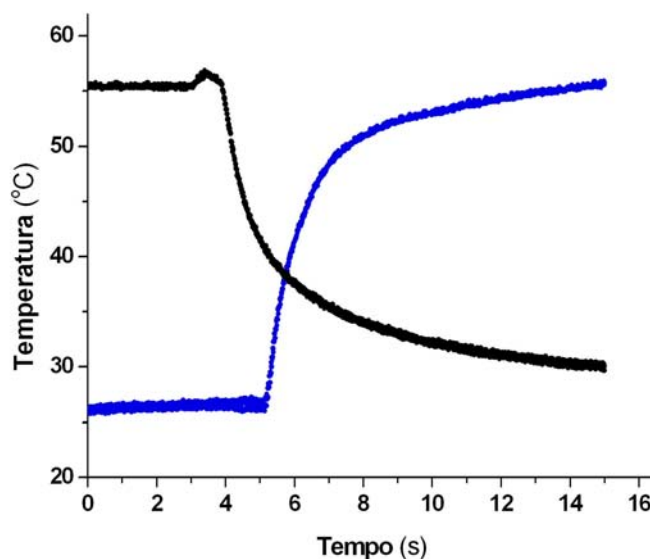


Figura 20: Tempo de resposta para o sensor de 100 k Ω

O tempo de resposta que vamos considerar como característico do sensor é aquele necessário para que a diferença de temperatura entre a inicial e a final seja reduzida à metade. Para o sensor de 100 k, portanto, temos um tempo de resposta de cerca de 1 segundo.

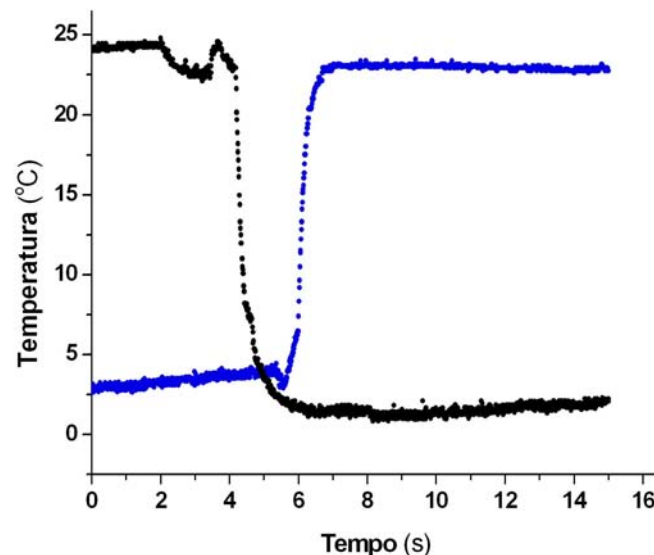


Figura 21: Tempo de resposta do sensor de 30 k Ω

Para este sensor, o tempo de resposta é ainda menor, sendo inferior a 0,5 segundo.

Embora o tempo de resposta para a utilização do sensor em meio gasoso seja maior, isto é, da ordem de alguns segundos, ele ainda é bem curto para realização dos experimentos que pretendemos.

A partir deste experimento podemos ilustrar, portanto, uma das maiores vantagens da utilização do nosso sensor, isto é, a alta velocidade de resposta, superior à maioria dos termômetros digitais de ponta metálica disponíveis. É interessante discutir com os alunos, por exemplo, os motivos físicos pelos quais o sensor de 30 k Ω (o de menor tamanho) tem uma sensibilidade maior.

Experimento 1: Resfriamento endotérmico da água com Cebion.

A temperatura da água diminui perceptivelmente quando adicionarmos à mesma um comprimido de vitamina C efervescente (Cebion). O que acontece, de fato, é que o

processo de dissolução do comprimido em água precisa de energia para ocorrer. Tem-se, assim, um processo de resfriamento endotérmico da água, que cede energia ao processo químico.



Figura 22: **Comprimido efervescente atirado em água**

Nós utilizamos o Data-MAP para medir o resfriamento de um copo d'água devido a adição de um ou mais comprimidos de Cebion. Os dados experimentais, obtidos com um termistor de 30 k Ω , seguem abaixo.

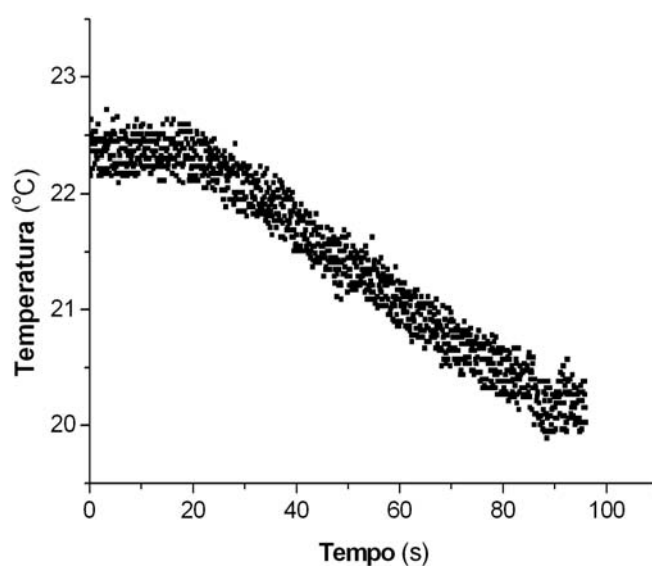


Figura 23: **Resfriamento endotérmico da água pela adição de Cebion**

Observa-se uma redução de cerca de 2°C na temperatura do líquido (cerca de 100 ml) pela adição de um único comprimido de vitamina C, no instante $t=20\text{s}$. O que acontece se jogarmos mais 2 comprimidos?

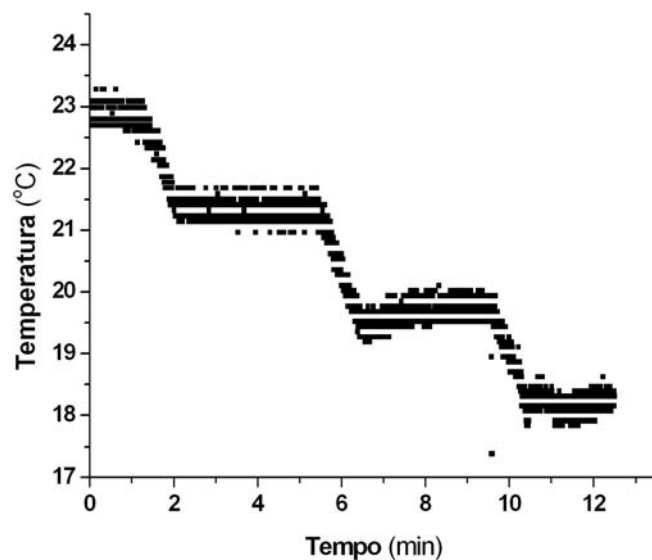


Figura 24: Lançamento de sucessivos comprimidos de Cebion

Os comprimidos são lançados em $t=2,0$, $t=5,5$ e $t=9,5$ min, respectivamente. Percebe-se que cada processo de resfriamento endotérmico consecutivo leva cerca de um minuto, sendo capaz de reduzir em praticamente 2°C a temperatura da água. Algo semelhante também parece ocorrer quando se adiciona açúcar em água:

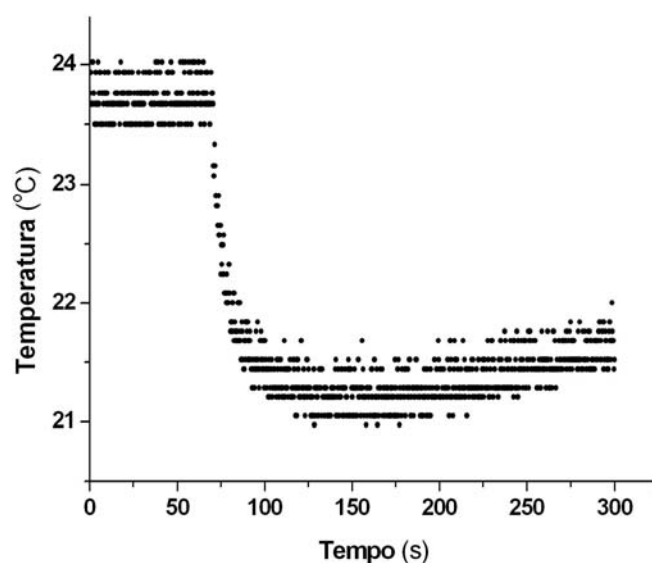


Figura 25: Resfriamento endotérmico da água por adição de açúcar

Mesmo quando este e a água encontram-se à mesma temperatura inicial, a dissolução do açúcar (uma colher de sopa) no meio líquido também consiste num processo endotérmico, sendo capaz de diminuir a temperatura de 100 ml de água.

Nota-se, portanto, que o poder de resfriamento para a quantidade de açúcar utilizada é similar ao efeito do comprimido de Cebion, algo que parece interessante investigar.

Experimento 2: Martelando com força.

O que acontece quando martelamos um prego sobre a parede ou sobre um pedaço de madeira? Para onde vai a energia mecânica contida na cabeça do martelo? Para tentar entender este processo, envolvemos um termistor de 30 k Ω em massinha de modelar e, em seguida, aplicamos uma pancada forte e rápida no conjunto com um martelo comum, conforme a ilustração.

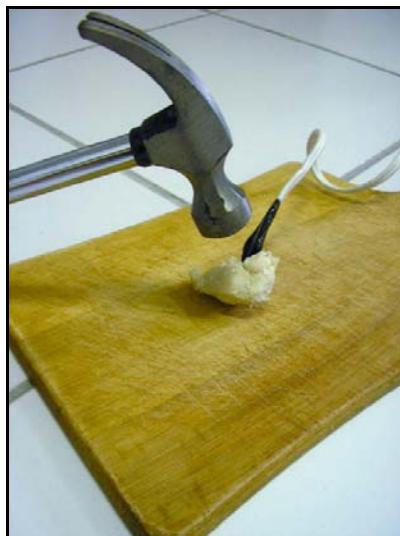


Figura 26: **Martelo em ação**

Note que a pancada forte e rápida ocorre em $t=0,8s$, registrando-se um súbito crescimento na temperatura, que se estabiliza num patamar cerca de 3°C acima do valor inicial.

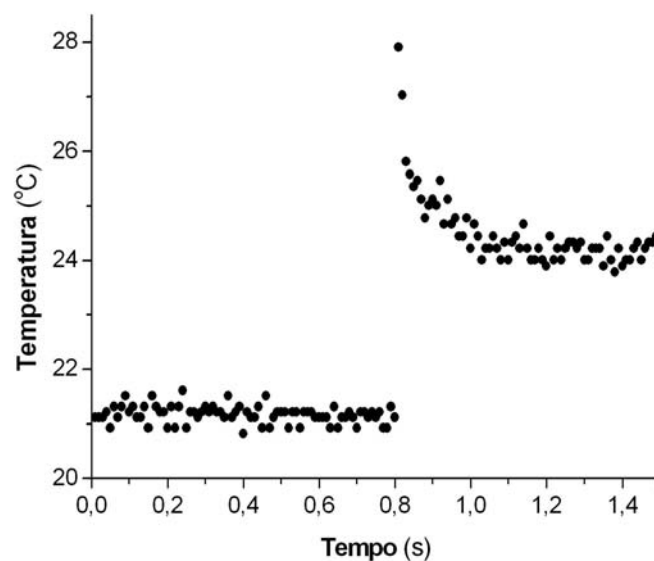


Figura 27: **Pancada com martelo**

A partir de tal resultado, pode-se considerar que o impacto do martelo traz uma quantidade grande de energia mecânica que se transforma, em parte, em energia térmica, traduzida no aquecimento da massinha.

O experimento também pode ser realizado com pancadas sucessivas. O gráfico a seguir mostra a queda abrupta na resistência elétrica oferecida pelo termistor em função de duas pancadas.

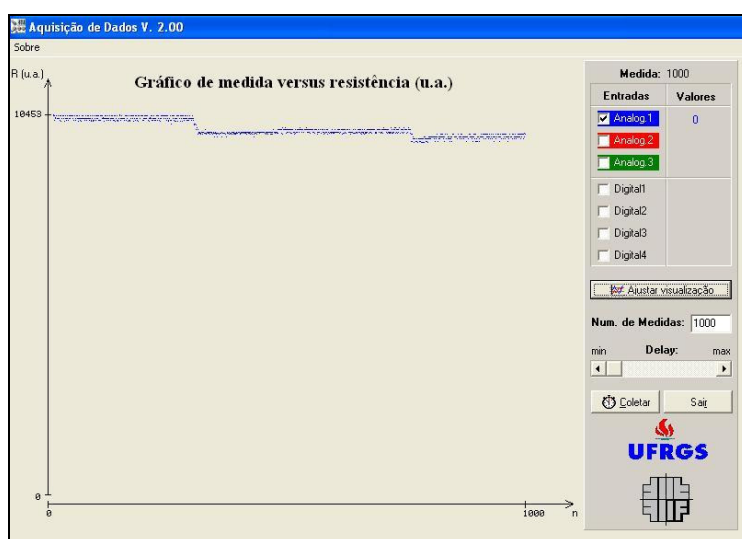


Figura 28: **Degraus de resistência elétrica**

A seguir, temos a evolução da temperatura com o tempo durante deste processo:

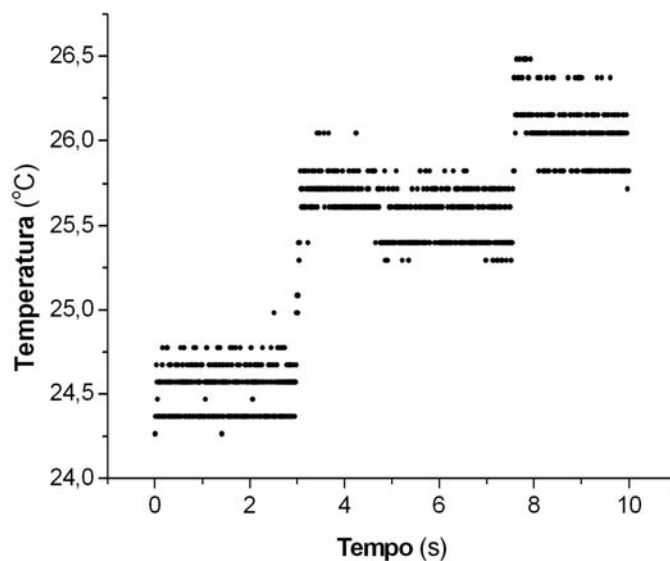


Figura 29: Duas pancadas consecutivas

O experimento pode ser o ponto de partida para uma interpretação da energia térmica como a energia (cinética e potencial) das moléculas da matéria. Deste modo, pode-se resgatar o elo entre estes dois tipos de energia, térmica e mecânica.

Experimento 3: Investigando a geladeira e o congelador.

A geladeira e o congelador são dois dos eletrodomésticos mais comuns. Pouco, entretanto, é ensinado sobre o funcionamento destes utensílios na física do ensino médio. Para explorar este campo, será preciso levar o microcomputador até a cozinha.

Um primeiro experimento que propomos, de fácil execução, é deixar um sensor de 10 k Ω (próprio para temperaturas próximas de 0°C e negativas) dentro do congelador durante uma noite, deixando a porta do utensílio totalmente fechada. O objetivo é ver se a temperatura interna é constante durante esse tempo. Propomos o mesmo experimento com a geladeira.



Figura 30: Computador instalado na cozinha

Para o caso do congelador, apresentamos abaixo o resultado obtido com o AqDados. A linha vermelha refere-se a outro termistor, este de $100\text{ k}\Omega$, colocado fora do congelador, monitorando a temperatura ambiente.

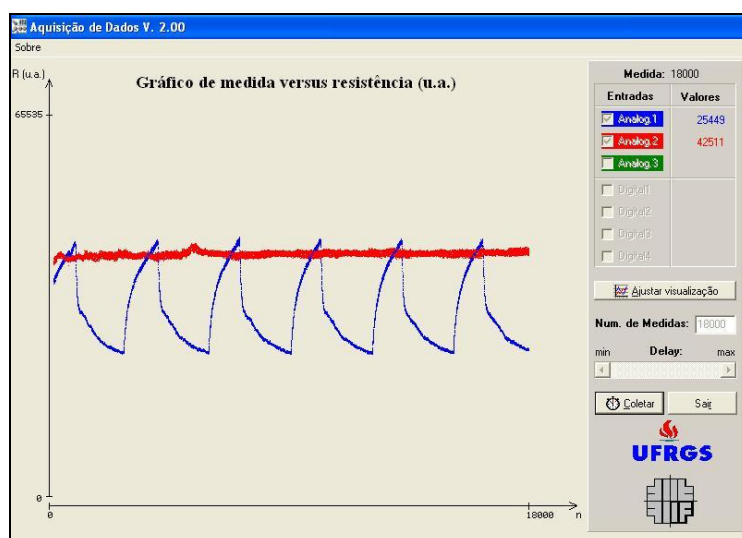


Figura 31: Congelador durante a madrugada

Conclui-se que, pelo menos do lado de fora do congelador, a temperatura permaneceu aproximadamente constante. A linha azul refere-se ao termistor de dentro do congelador, e pode ser mais bem interpretada no gráfico de temperatura vs. tempo:

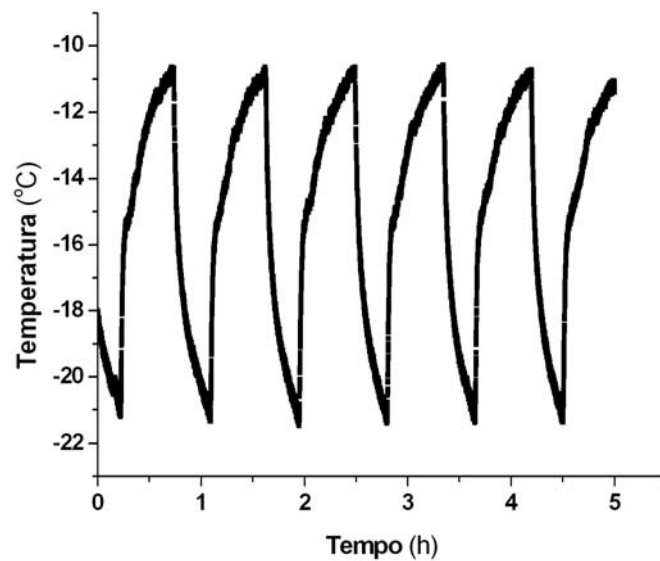


Figura 32: Ciclo de temperatura do congelador

Veja que inicialmente a temperatura interna do congelador é de aproximadamente 18°C. Neste momento, utilizamos um termômetro digital para confirmar esta informação. Ao longo da madrugada, a temperatura interna oscila entre cerca de -11°C e -21°C, e cada ciclo leva cerca de uma hora.

A interpretação destes dados é simples: o isolamento térmico do congelador não é perfeito e o compressor não permanece ligado o tempo todo. Deste modo, com o compressor desligado, o sistema absorve calor do meio externo, que está bem mais aquecido. Quando a temperatura interna do congelador atinge certo valor crítico (próximo de -11°C, de acordo com este experimento), um termostato (um sensor do próprio eletrodoméstico) avisa ao circuito do aparelho que o compressor deve ser religado a fim de resfriar o compartimento novamente. Ele permanece ligado até que a temperatura atinge um valor mínimo desejado (cerca de -21°C), quando o compressor volta a se desligar, completando um ciclo.

Portanto, de acordo com o experimento, o compressor atua por 15 a 20 minutos, resfriando o compartimento interno de hora em hora. Também pode-se ver que o isolamento térmico deste congelador é capaz de conservar a temperatura abaixo do valor crítico por não mais que 45 minutos.

Temos agora o resultado para o ciclo da geladeira:

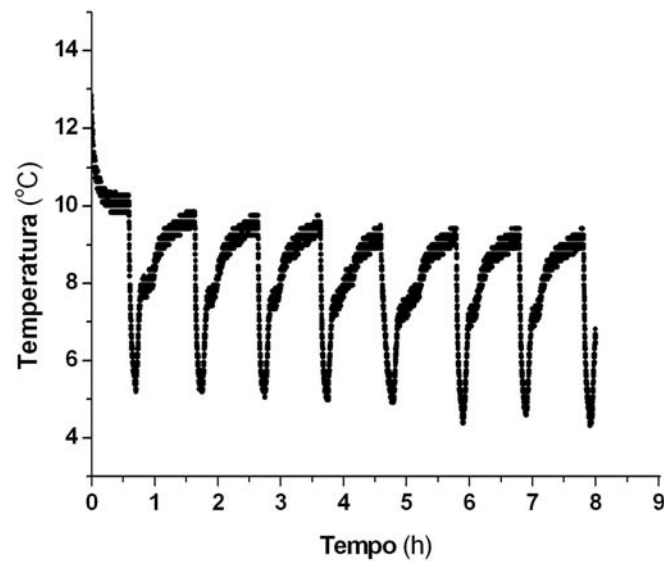


Figura 33: Ciclo de temperatura da geladeira

A interpretação deste resultado é idêntica à anterior. Até a duração do ciclo é a mesma: cerca de uma hora. As únicas diferenças são as temperaturas extremas, que são de 5 a 10°C para a geladeira; e o isolamento térmico, que é conserva a temperatura interna da geladeira abaixo do valor crítico por mais de 45 minutos. O compressor, portanto, atua por apenas 5 ou 10 minutos.

Agora que já conhecemos um pouco mais sobre estes dois sistemas de resfriamento doméstico, vamos ver o que acontece quando interferimos nestes ciclos de funcionamento, ou seja, quando abrimos a porta da geladeira ou do congelador, fechando-as um pouco depois. Qual o impacto deste abre-e-fecha no ciclo do aparelho?

Com esse objetivo, coletamos dados com um termistor dentro do *congelador* por uma hora. Em três momentos específicos, abrimos a porta, voltando a fechá-la somente após segundos: primeiro 15, depois 30, e por fim 60 segundos. Entre uma abertura e outra demos tempo suficiente ao congelador para se resfriar novamente. Os instantes específicos de abertura da porta são $t=10$, $t=26$ e $t=42$ minutos. Veja o resultado:

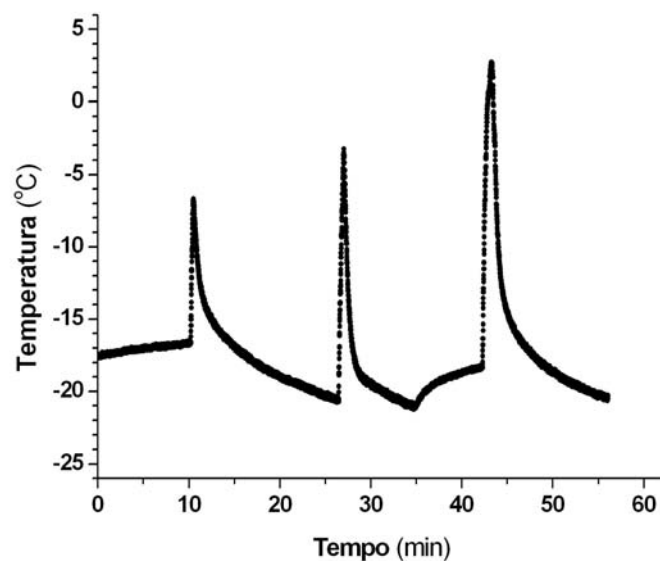


Figura 34: **Prejuízo na abertura do congelador**

Conforme esperado, quanto mais tempo deixa-se a porta aberta, maior o impacto na temperatura interna do congelador, que sobe muito rapidamente nesta situação. E mesmo para um tempo de abertura típico e não muito longo, de 15 segundos, a temperatura interna já é levada acima do valor crítico do sistema (cerca de -11°C de acordo com o experimento anterior), o que obriga o compressor a ser acionado precocemente, gerando um consumo de energia elétrica adicional.

Repetindo o experimento anterior para a *geladeira*, obtivemos o seguinte:

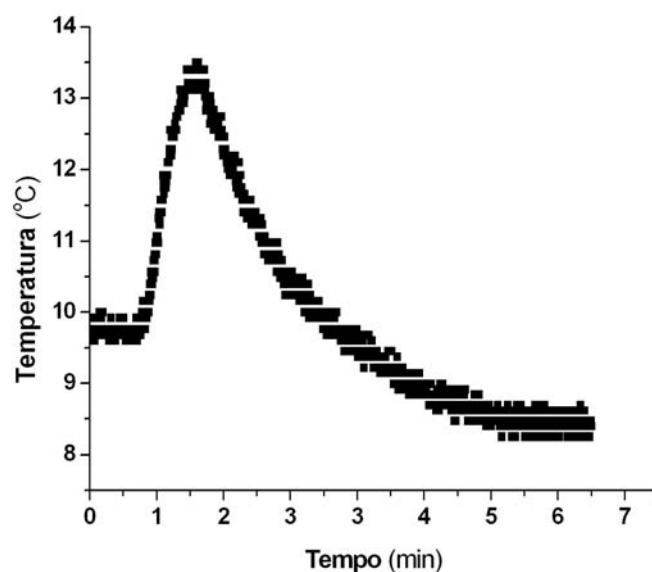


Figura 35: **Prejuízo na abertura da geladeira**

Os dados foram coletados por apenas alguns instantes, com objetivo de observar com maior detalhe o aspecto da curva de aquecimento. Neste período a porta foi aberta uma única vez, permanecendo assim por 30 segundos. Nota-se que a temperatura continua subindo mesmo após este tempo, atingindo mais de 13°C, acima da temperatura crítica de acionamento do compressor.

Um estudo interessante poderia relacionar estes tempos com as potências dos aparelhos e seu conseqüente impacto no consumo de luz da residência ou da escola. Outro estudo possível é a repetição destes experimentos para comparação de diferentes geladeiras e congeladores, obtendo seus ciclos característicos. Um terceiro experimento seria analisar, simultaneamente, o crescimento da temperatura interna em três diferentes pontos do congelador ou geladeira pela abertura da porta.

Experimento 4: Refrigerante com gelo.

Que tal observar o tempo que leva um copo de refrigerante quente para se tornar bem gelado após a adição de alguns cubos de gelo? E quando já estiver gelado, se deixado à temperatura ambiente, quanto tempo levará para voltar a ficar insuportável?

Adicionando 3 cubos de gelo (de cerca de 50 gramas, a cerca -15°C) em 250 ml de refrigerante “quente” (isto é, 26°C), temos:

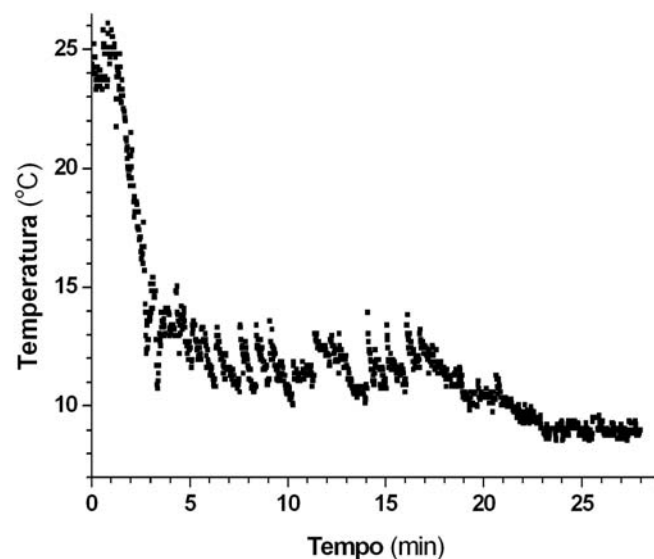


Figura 36: Adição de cubos de gelo no refrigerante

Como não mexemos a mistura refrigerante/gelo, o tempo que o sistema levou para resfriar foi mais longo que o habitual, levando mais de 25 minutos para atingir uma temperatura agradável: cerca de 8°C. A partir de então, com o gelo já totalmente derretido e misturado ao refrigerante, o sistema é deixado à temperatura ambiente, começando a esquentar até o equilíbrio térmico com o meio externo.

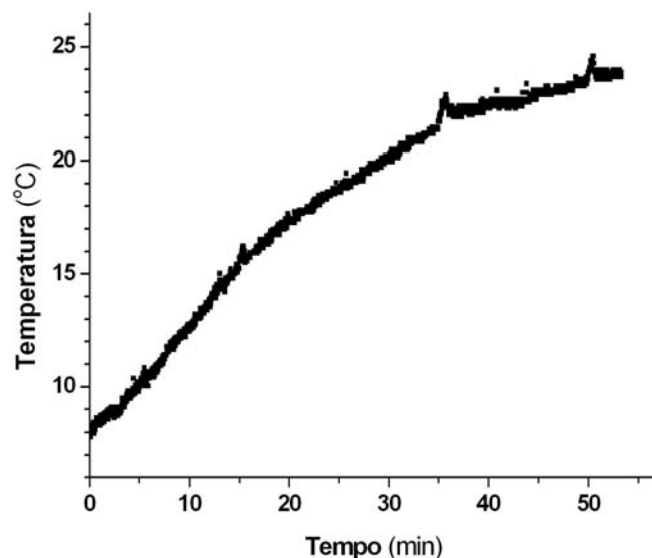


Figura 37: Refrigerante entrando em equilíbrio térmico

Veja que em pouco mais de 10 minutos o refrigerante já está acima de 13°C e seu sabor já não é mais tão agradável. O equilíbrio térmico completo leva cerca de uma hora.

Pode ser realizada uma abordagem um pouco mais quantitativa destes resultados, comparando experimento e teoria para dentro do tema calorimetria e calor específico. A partir dos resultados pode-se estimar as perdas de calor para o ambiente, já que o sistema refrigerante/gelo não é isolado.

Experimento 5: A panela de macarrão.

Para fazer macarrão é necessário ferver uma grande quantidade de água para, só então, se adicionar a massa pré-cozida. Aproveitamos este processo, que leva cerca de 15 minutos para 2,5 litros de água, para monitorar a evolução da temperatura com o tempo em 3 pontos da panela de aço inox. Para isso, utilizamos 3 termistores de 100 kΩ.



Figura 38: **Panela de macarrão sensoreada**

- S1**: no fundo (em contato direto com o metal);
- S2**: dentro da própria água;
- S3**: na alça da panela, que também é de aço inox.

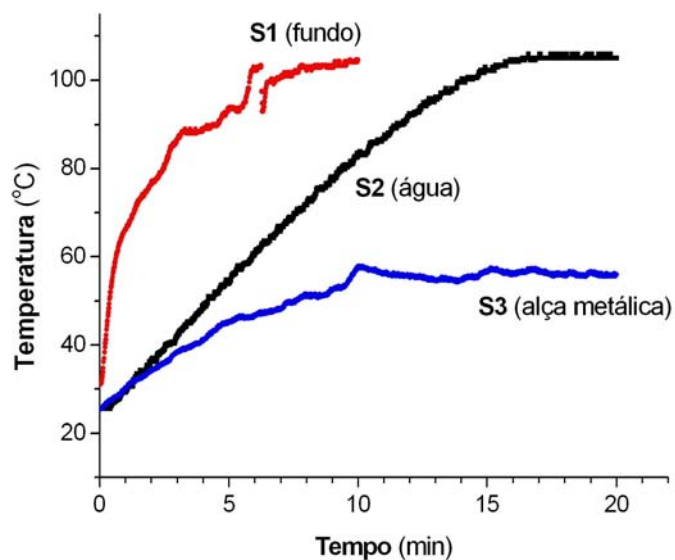


Figura 39: **Temperatura em 3 pontos da panela de macarrão**

De acordo com o resultado acima, pode-se tirar algumas conclusões interessantes. Uma delas é que o fundo atinge rapidamente a temperatura máxima de ebulição da água, 100°C. Em apenas 2 minutos a temperatura do fundo já é superior a 80°C.

Quanto à água, podemos ver que esquenta a uma taxa constante, de aproximadamente 5°C por minuto. Conhecendo-se a quantidade de água (aprox. 2500 g) e seu calor específico (1,0 cal/g°C⁻¹), pode-se calcular a quantidade de energia eficaz Q_E fornecida pela chama do fogão. E considerando que a massa de água inicia a fervura em $t=15$ min, tem-se a potência efetiva P_{EF} aproximada da chama do fogão nestas condições:

$$Q_E \cong 190 \text{ kcal } (\cong 800 \text{ kJ})$$

$$P_{EF} \cong 900 \text{ W}$$

Em relação ao terceiro e último sensor, é interessante notar que, apesar da alça ser também metálica, sua temperatura pára de crescer em aprox. $t=10$ min, estabilizando em cerca de 55°C até o início da fervura da água. Como esta temperatura não é insuportável para a mão humana, é possível retirar a panela do fogo sem usar luvas.

Discussões muito interessantes podem ser feitas sobre questões de dissipação térmica, que mantém a alça metálica abaixo de 60°C, e o fundo a 100°C.

Experimento 6: Aquecimento do metal. Efeito Picanha.

A ponta de uma longa barra chata metálica de aço inox é aquecida pela chama de uma vela. São colocados termistores de 100 kΩ em três pontos longitudinais da barra, cada qual a uma distância da fonte de calor.

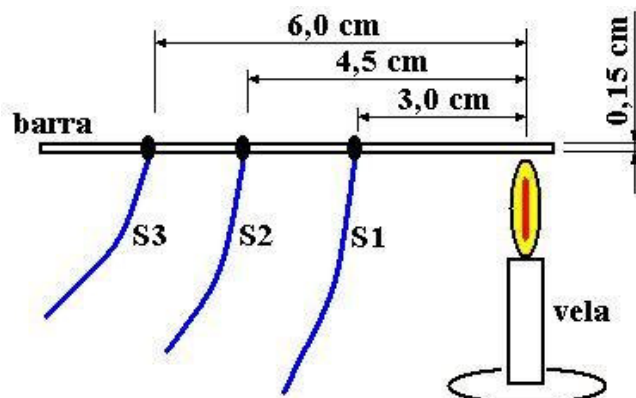


Figura 40: Montagem dos sensores na barra metálica

Os sensores são posicionados na face superior da barra, que é aquecida pela face inferior através da vela.



Figura 41: Barra metálica sendo aquecida

O resultado mostra que até $t=40$ s nenhum efeito é sentido nos dois pontos mais distantes da chama da vela. Em outras palavras, pode-se imaginar que exista uma “onda” de calor com origem na ponta da barra.

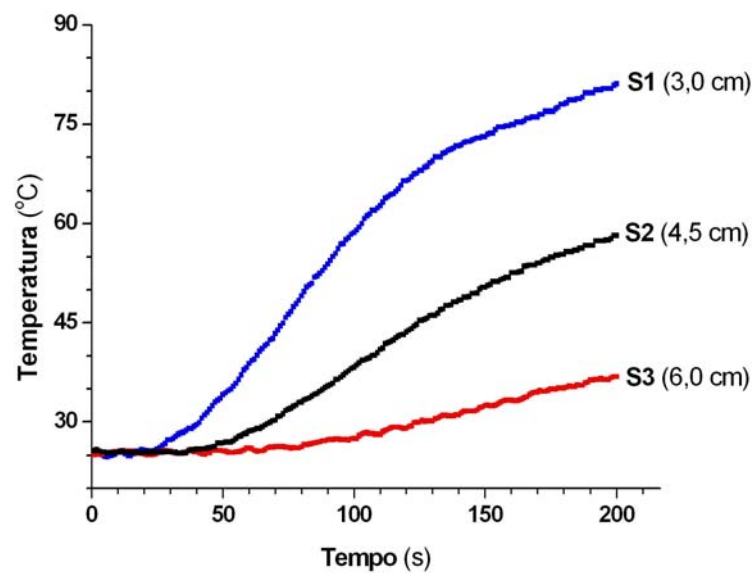


Figura 42: Aquecimento de barra metálica em 3 pontos

Três minutos mais tarde pode-se ver que os pontos encontram-se em temperaturas distintas e continuam aquecendo, mas com velocidades diferentes.

O Efeito Picanha.

Depois de tomar dados do aquecimento da barra em função da distância, pode-se retirar a fonte de calor (apagando a vela) e reiniciar imediatamente o processo de medição, com objetivo de medir a velocidade de resfriamento em pontos diferentes. Escolhemos, então, os pontos mais distantes entre si: **S3**, $d=(6,0 \pm 0,5)$ cm; e **S1**, $d=(3,0 \pm 0,5)$ cm, os mesmos do caso anterior.

O resultado bruto obtido com o AqDados segue abaixo:

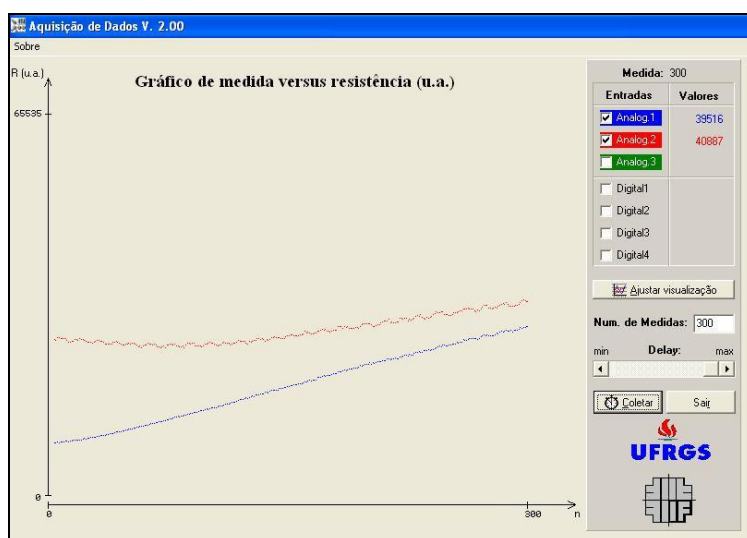


Figura 43: Leitura original de dados no programa de aquisição

Transformando os dados de resistência elétrica em temperatura através dos parâmetros de calibração do termistor de $100\text{ k}\Omega$, obtivemos também um o gráfico de temperatura versus tempo.

Analisando tal gráfico vê-se que as temperaturas finais registradas conferem com as iniciais de resfriamento que acabamos de mostrar. O mais interessante, contudo, é observar a curva de resfriamento do ponto mais distante da fonte de calor (**S3**) no processo de aquecimento. Considerando que $t=0$ é, aproximadamente, o instante em que foi apagada a vela, pode-se notar que esse ponto continua aquecendo por mais de um minuto até iniciar, de fato, seu processo de resfriamento.

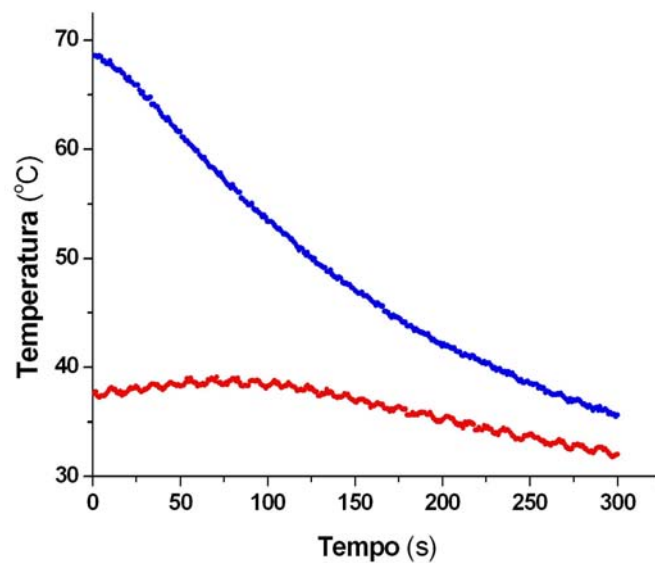


Figura 44: Resfriamento da barra metálica: o Efeito Picanha

O que se vê é similar ao que acontece quando se aquece uma peça de carne num forno doméstico. Como o calor penetra de fora para dentro, é natural que a parte interna da carne aqueça mais lentamente. Portanto, ao se retirar a carne do forno, o miolo encontra-se a uma temperatura inferior à da camada mais externa da peça. Por isso os bons cozinheiros colocam a carne para “descansar” antes de servi-la.

A camada mais externa tende a perder seu calor não só para o ar, mas também para o próprio miolo que está mais frio. Assim, diz-se que a carne continua cozinhando mesmo após ter saído do forno. No caso da barra metálica tem relevância apenas a dimensão longitudinal e, portanto, pode-se considerar que o “miolo”, a parte mais interna, é justamente o ponto **S3**.

Como desenvolvimento do experimento, dependendo do grau de profundidade desejado, pode-se tentar comparar os resultados obtidos com previsões de modelos matemáticos de condução térmica. Embora existam dificuldades para realizar isto no ensino médio, modelos computacionais simples podem tornar a análise possível, trazendo para a sala de aula temas importantes, apesar de pouco estudados.

Experimento 7: Condução vs. convecção de calor.

O calor pode ser transmitido de um corpo a outro de diferentes formas. Um experimento simples que pode ser feito para comparar condução e convecção de calor consiste no aquecimento de um tubo metálico pequeno. Pode-se utilizar uma vela para aquecer o tubo, de aço inox, que deve permanecer na horizontal, conforme a ilustração.

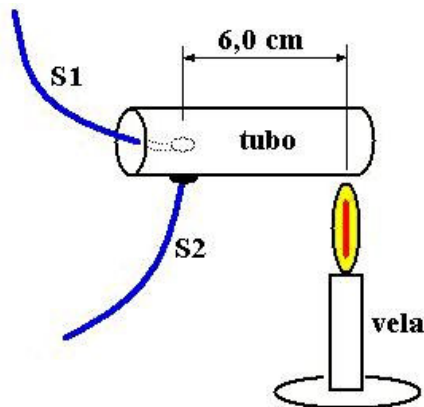


Figura 45: Esquema de montagem dos sensores no tubo

A uma determinada distância da vela, ao longo do tubo, posicionam-se dois termistores de 100 k Ω , alinhados verticalmente. Porém, um deles deve estar do lado de fora do tubo, em contato direto com o metal (preso com fita adesiva), enquanto o outro deve ficar do lado de dentro, mas sem contato direto com a parede interna.



Figura 46: Tubo metálico em aquecimento

S1: termistor interno sem contato direto com o metal, $d=(6,0 \pm 0,5)$ cm.

S2: termistor externo em contato com o metal, $d=(6,0 \pm 0,5)$ cm.

Deste modo, o termistor interno ao tubo estará medindo a temperatura do ar em sua vizinhança, enquanto que o termistor externo estará medindo a própria temperatura do tubo, no mesmo ponto da vertical que o outro e, portanto, ambos a mesma distância longitudinal da fonte de calor.

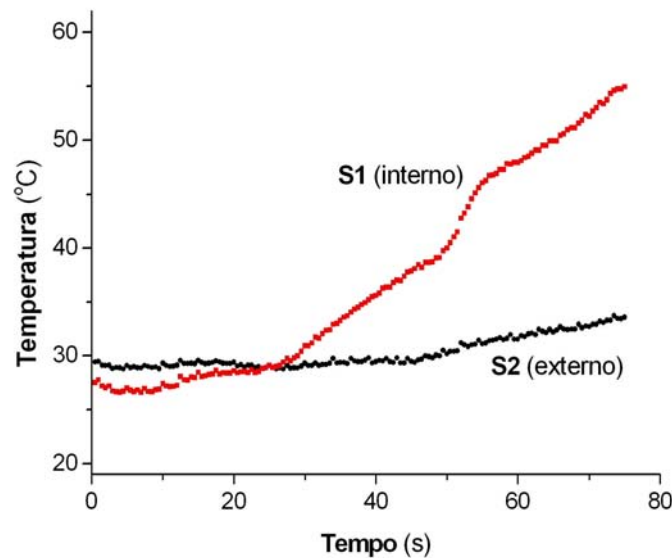


Figura 47: **Condução versus convecção de calor**

Nota-se que após mais de um minuto prevalece o efeito de convecção, isto é: a temperatura do ar sobe muito mais que a temperatura do metal. É importante ressaltar que a chama da vela ataca diretamente a parede externa do tubo.

Ao que parece, o ar interno ao tubo (imediatamente acima da parte externa do tubo aquecida diretamente pela chama da vela) aquece rapidamente e se expande, criando correntes de convecção dentro do tubo, que alcançam o termistor interno **S1**. Embora existam também correntes de convecção externas ao tubo, estas são essencialmente verticais e pouco atingem o termistor externo **S2**. O efeito interno é muito mais significativo, uma vez que a corrente é literalmente canalizada pelo próprio tubo.

Experimento 8: Resfriamento do café.

Poucas pessoas não gostam de café. Entretanto, ele precisa estar devidamente quente e bem preparado para que possa ser saboreado por seus admiradores mais exigentes.

Quando abandonada à temperatura ambiente, uma xícara com café quente irá resfriar lentamente, até que o café esteja em equilíbrio com o meio externo mais frio.

A Lei do resfriamento de Newton para líquidos prevê a seguinte dependência entre a temperatura θ do café em função do tempo:

$$\theta(t) = \theta_{amb} + (\theta_0 - \theta_{amb})e^{-kt}$$

onde θ_{amb} é a temperatura ambiente, θ_0 é a temperatura inicial do líquido e k é a constante de decaimento, característica do meio externo. A temperatura $\theta(t)$ é dada em kelvin para t em segundos.

A verificação experimental desta teoria é bastante simples. Basta introduzir um termistor de 100 k Ω devidamente isolado dentro de uma xícara de café, deixando-o totalmente submerso.



Figura 48: Sensor na xícara de café

Como foi utilizado o AqDados, foi escolhido o delay máximo: um segundo. Entretanto, caso se queira trabalhar com outro programa e sejam possíveis outros delays, pode aumentar este parâmetro, já que a natureza do experimento em si não requer mais que três ou quatro medidas por segundo.

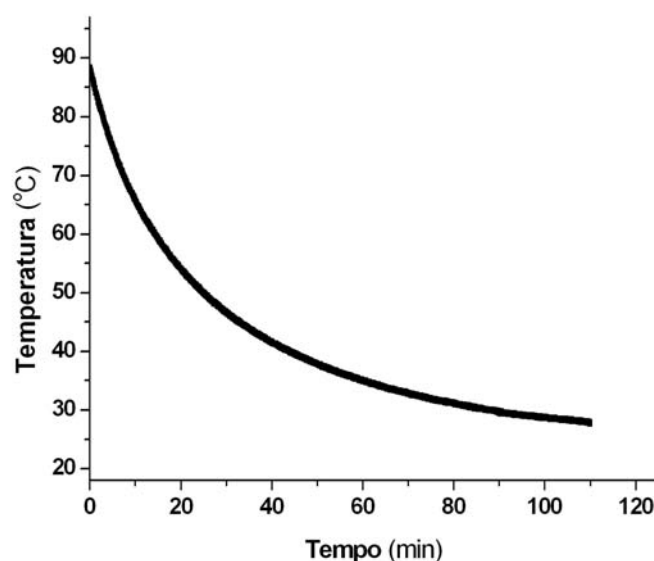


Figura 49: **Resfriamento (newtoniano) do café**

A partir do gráfico, identificam-se a temperatura ambiente, para a qual o café tende, e a temperatura inicial, isto é, a temperatura dele quando é imediatamente retirado da cafeteira ou garrafa térmica:

$$T_{amb} = (30 \pm 2)^{\circ}\text{C}$$

$$\theta_0 = (88 \pm 2)^{\circ}\text{C}$$

Uma atividade interessante é a exploração do conceito de decaimento exponencial, presente em tantos fenômenos. Aqui, em particular, cabe determinar, graficamente, a “meia-vida” da temperatura do café, isto é, o intervalo de tempo necessário para que a diferença entre a temperatura do café e a temperatura ambiente seja reduzida à metade. Note que este tempo é de aproximadamente 17 minutos.

Outra observação importante é que o café numa xícara leva de 5 a 10 minutos, segundo o gráfico, para cair abaixo de 70°C, temperatura limite entre a sensação de café quente e café ruim segundo alguns degustadores.

Numa garrafa térmica?

A invenção da garrafa térmica permitiu a manutenção do café a uma temperatura palatável por muito mais tempo. Quanto tempo? E, mais que isso, nota-se que no dia seguinte à preparação do café fresco, ainda sobra na garrafa térmica uma quantidade morna. Que temperatura é essa?



Figura 50: Sensor dentro da garrafa térmica

Para descobrir isso, introduzimos um termistor numa garrafa térmica com café recém-preparado, fechamos a mesma o melhor que pudemos coletamos dados por 18 horas.

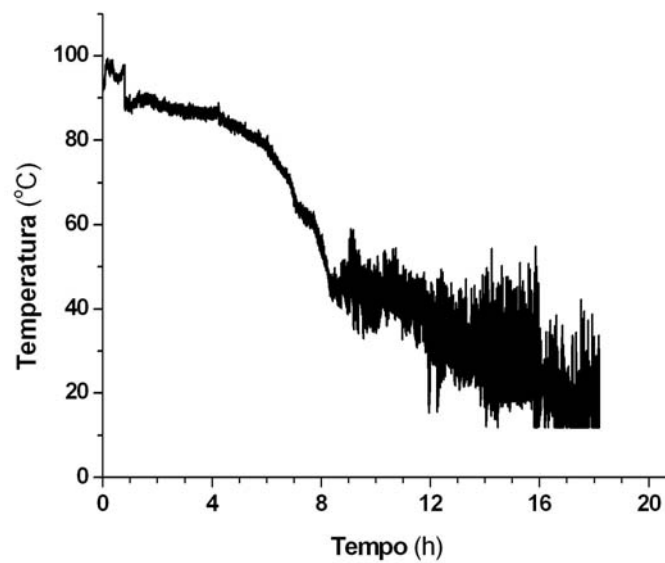


Figura 51: Resfriamento do café na garrafa térmica

Observa-se que mesmo após 15 horas o café ainda não atingiu completamente o equilíbrio térmico com o meio externo devido ao isolamento térmico da garrafa.

O experimento pode motivar uma discussão sobre o funcionamento da garrafa, que subentende mecanismos de isolamento específicos para cada um dos meios de transmissão de calor: irradiação, convecção e condução. Também parece interessante que o resfriamento do café nestas condições de isolamento não siga a teoria newtoniana como na xícara.

Experimento 9: Temperatura ambiente ao longo de 24 horas.

Qual a variação de temperatura num determinado local durante um dia inteiro? Em um primeiro momento, utilizamos um único termistor de $100\text{ k}\Omega$ como sensor, colocado durante este tempo na varanda de um apartamento no bairro de Botafogo, no Rio de Janeiro, próximo à Praia. O experimento tem início às 23h do dia 25 de outubro de 2006.

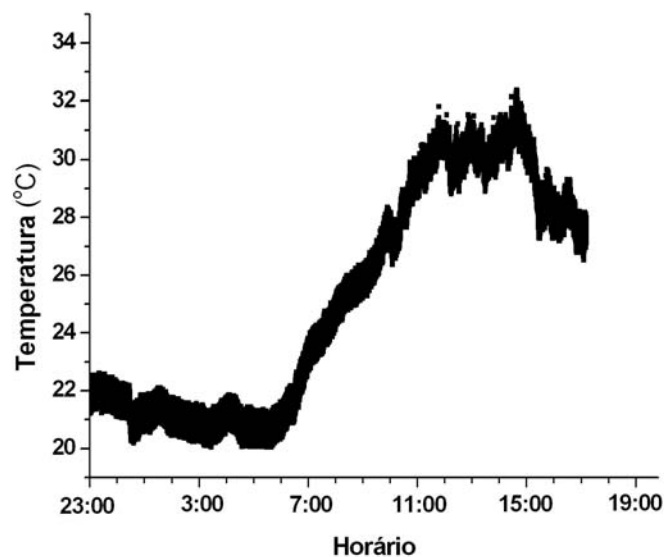


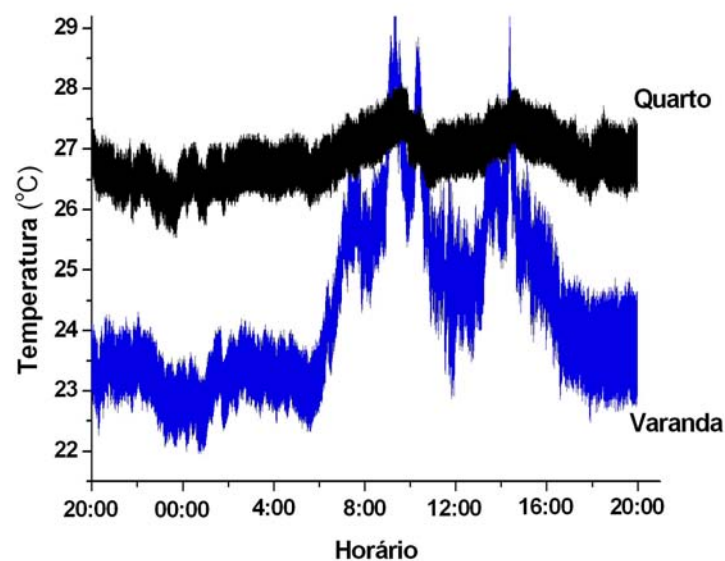
Figura 52: Variação da temperatura ao longo de um dia

Note que a temperatura cai cerca de 2°C durante a madrugada e começa a subir rapidamente a partir de 5h da manhã. A temperatura alcança a marca de 31°C por volta das 10h30min, por onde permanece até perto das 14h, quando começa a decair.

Infelizmente, as últimas 6 horas de dados (21600 medidas) foram perdidas na manipulação computacional.

Vale lembrar que o sol nasce muito cedo no Rio de Janeiro nesta época do ano e, em particular, vinha nascendo por volta das 5h15min na semana de outubro em questão. Portanto, vê-se que o crescimento da temperatura acompanha o nascer do sol. No entanto, a queda de temperatura por volta das 14h parece mais um efeito local da varanda na qual estava posicionado o sensor, uma vez que o dia 26 de outubro foi um dia bem quente até o fim da noite, quando desabou temporal sobre o bairro. Possivelmente o termistor entrou numa região de sombra a partir deste horário, resfriando-se gradualmente e justificando as leituras de temperatura mais baixas.

Em outro dia mais frio, 22/11/2006, repetimos o experimento com dois termistores de 100 k Ω , sendo um na varanda e outro dentro do quarto, iniciando a coleta de dados às 20h.



Pode-se perceber que a temperatura do quarto, cujas portas (de entrada e da varanda) estavam fechadas todo o tempo, é menos sensível à oscilação de temperatura do ambiente ao longo do dia. Em particular, como o dia foi frio, o quarto permaneceu mais aquecido durante quase todo o período de medição, o que reflete o poder do isolamento térmico permitido pelas paredes de concreto da estrutura do prédio.

Um estudo interessante pode ser a repetição do experimento para dias diferentes: um dia muito quente, um dia muito frio, um dia quente com súbita pancada de chuva, etc., comparando a temperatura interna do quarto (fechado) e a temperatura ambiente externa (varanda).

Outra possibilidade é investigar o funcionamento do ar condicionado, de modo análogo à investigação feita neste trabalho sobre o congelador (*experimento 3*). Para este caso, uma sugestão é comparar as temperaturas interna do quarto fechado (no centro deste), temperatura ambiente externa (na varanda ou fora da janela). Outra comparação interessante é entre a temperatura do ar muito próximo à saída do condicionador e a temperatura do ar na vizinhança do radiador (que fica para o lado de fora do quarto). Uma última proposta seria investigar a temperatura em três pontos diferentes dentro do quarto, separados por distâncias específicas em linha reta, ora horizontal, ora verticalmente.

Experimento 10: Corpo humano. Sensibilidade da pele e evaporação.

Um conjunto de experimentos simples consiste em utilizar um termistor de 30 k Ω para simulação de situações em que nossa pele ou corpo funcionam como termômetro. Numa primeira situação, sopramos sobre o termistor ar de nossa própria boca, fazendo biquinho, por exatos 3 segundos.



Figura 53:
Soprando sensor com bico semi-fechado



Figura 54:
Soprando sensor com a boca aberta

Nota-se que a temperatura sobe alguns graus. Em seguida, quando a temperatura do termistor volta a equilibrar-se com o ambiente, sopramos novamente, pelo mesmo

intervalo de tempo, porém com a boca totalmente aberta. Registra-se, então, um crescimento ainda maior na temperatura do sensor objeto.

O experimento atinge o único e simples objetivo de ilustrar a diferença de temperatura entre o ar que sai de nossa boca em duas situações extremas: com a boca semi-fechada, em forma de bico, reduzindo-se a área de escoamento do ar e aumentando a velocidade; e com a boca escancarada, aumentando-se drasticamente a seção de escoamento do mesmo, que sai, contudo, a uma velocidade bem menor.

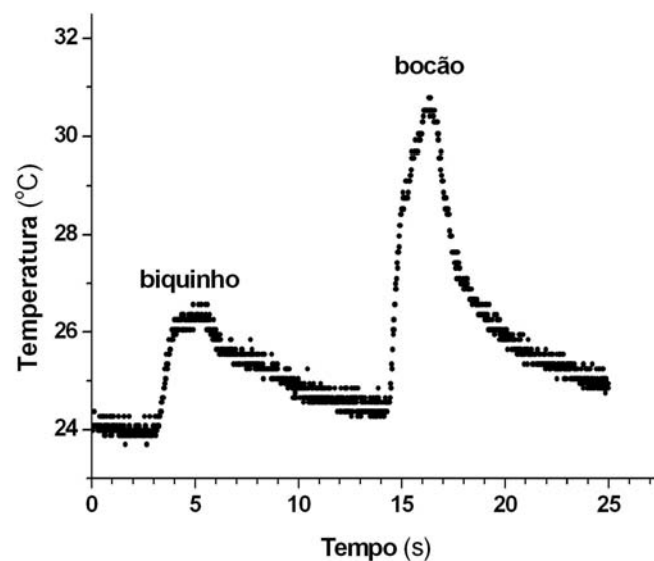


Figura 55: Temperatura do ar que sopramos

Nossa proposta de aprofundamento está na discussão posterior à experimentação: considerando que a temperatura corporal interna do indivíduo é a mesma nas duas situações e que, portanto, o ar que provém dos seus pulmões está originalmente à mesma temperatura, como explicar o diferencial na temperatura do ar expirado?

Sensibilidade da pele e Evaporação.

Sabemos que sentimos um pouco de frio ao sairmos do banho se deixarmos a porta entreaberta, permitindo passagem de corrente de ar. Isto ocorre, muitas vezes, mesmo que o banho tenha sido frio. Também já observamos que, em geral, nosso corpo sua num dia de calor, e que o suor traz à pele uma sensação de frescor.

O experimento seguinte utiliza o mesmo termistor para simular nossa pele em situações como as acima descritas. Inicialmente, o sensor registra a temperatura ambiente. Quando é mergulhado num copo metade cheio de água, em $t=7$ s, uma queda na temperatura é notada. Interessa mais, contudo, notar que, em $t=14$ s, quando o sensor é rapidamente retirado da água, a temperatura do termistor volta a cair, mesmo sendo a temperatura externa superior à da água.

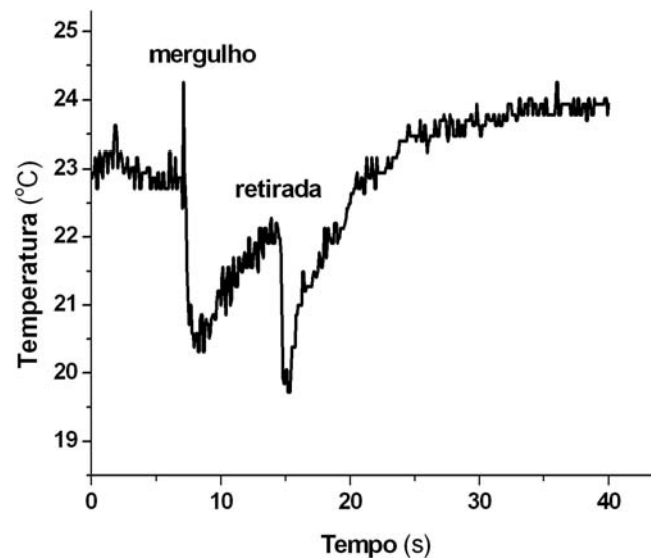


Figura 56: Efeito da evaporação da água

O que ocorre é, simplesmente, efeito da evaporação da água residual sobre o termistor. Este efeito predomina, por um pequeno intervalo de tempo, sobre a absorção de calor do ambiente. O que acontece quando repetimos o experimento mergulhando o termistor em álcool?

O gráfico seguinte sugere que a temperatura ambiente seja de 23°C, contra 18°C do álcool no copo. Percebe-se que quando o termistor é retirado da submersão ($t=20$ s), sua temperatura cai mais de 6° até perto de $t=25$ s, quando o efeito de absorção de calor do meio externo começa a prevalecer.

Se compararmos, agora, estes dois últimos resultados, vê-se que concordam com nossa experiência cotidiana: a sensação de frio é bem maior quando passamos álcool ou éter

sobre a pele do que quando passamos água à mesma temperatura, em função da evaporação de cada líquido.

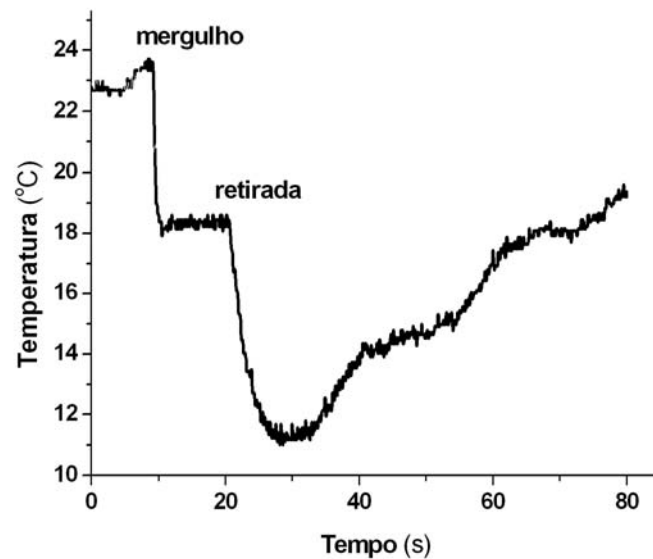


Figura 57: Efeito da evaporação do álcool

As perguntas que, então, poder ser colocadas, no mínimo, duas: o que é exatamente o processo de evaporação e por que ele causa o resfriamento do termistor? Qual a diferença constituinte entre a água e o álcool que gera a discrepância de comportamento observada nestes resultados?

O último experimento desta abordagem simula a sensação de nossa pele quando entra em contato com diferentes materiais, que estão à temperatura ambiente: cerca de 24°C.

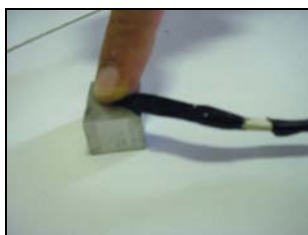


Figura 58:
Bloco de alumínio

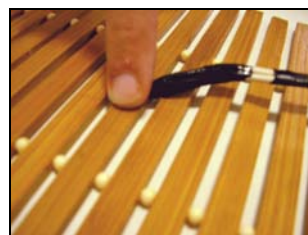


Figura 59:
Pedaço de madeira

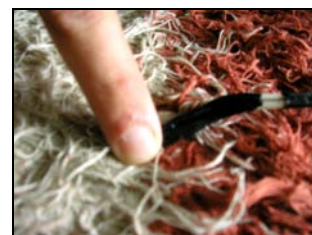


Figura 60:
Cobertor de frio

Deste modo, pressionamos o mesmo termistor de 30 k Ω contra a ponta do dedo indicador, até que ele se aproximasse da temperatura do corpo humano. Assim ele

atingiu 30°C. Em seguida, pressionamos cada um dos 3 objetos distintos com este dedo por alguns segundos, de modo que o termistor estivesse simultaneamente em contato como o dedo iniciador e o próprio objeto neste tempo. Acompanhe o resultado:

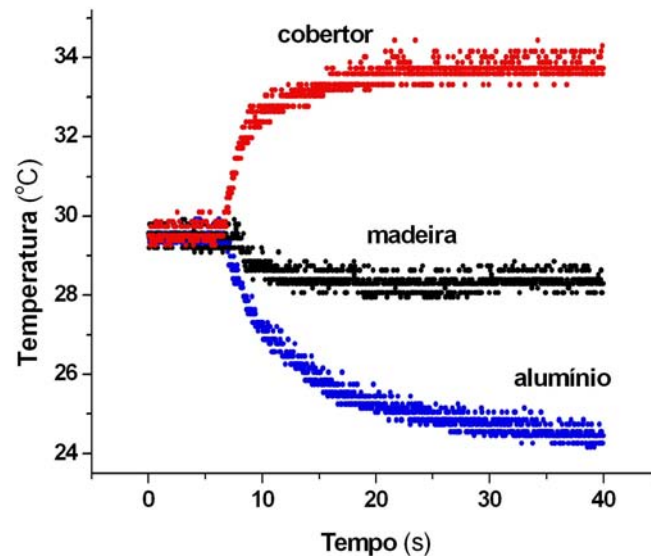


Figura 61: **Pele em contato com objetos diferentes**

O que se registra é o seguinte: o conjunto termistor/dedo se resfria muito e rapidamente quando em contato com o alumínio; pouco quando em contato com a madeira; e esquenta quando envolvido pelo cobertor.

Se pensarmos no termistor como um sensor da própria pele humana, podemos interpretar as situações cotidianas em que objetos metálicos parecem frios, objetos de madeira tendem a ser mais “neutros” e um cobertor parece “quente”.

A discussão dos mecanismos que produzem essas sensações térmicas pode ser um desenvolvimento muito interessante para esse experimento, em particular para a física do ensino médio.

Experimento 11: Superresfriamento.

Diz-se que um líquido está superresfriado quando encontra-se a uma temperatura abaixo do seu ponto de fusão. O fenômeno ocorre, em geral, quando se aquece a substância sólida até a fusão e completa e, em seguida, coloca-se a mesma para resfriar muito

lentamente. Embora este processo possa observado para diversas substâncias, inclusive a água, utilizamos em nosso experimento o tiosulfato de sódio, composto não-tóxico disponível em laboratórios acadêmicos de química. O ponto de fusão do tiosulfato de sódio é algo entre 40 e 50°C. Maiores detalhes podem ser encontrados em [7].



Figura 62: Grãos de tiosulfato num recipiente

O procedimento experimental realizado é simples, mas requer cuidado e paciência. Primeiramente, espalha-se abundantemente grãos de tiosulfato (que tem a aparência de sal grosso comum) sobre uma xícara de café, que é feita de material cerâmico, portanto refratário, mau condutor de calor.



Figura 63: Tiosulfato em banho maria

Então se deve inserir um termistor de 100 k Ω entre os grãos, de modo a ficar totalmente envolvido. Coloca-se a xícara para aquecer em banho Maria ($t=0$ min) numa frigideira comum posta sobre a chama de um fogão. Deste modo o aquecimento será mais lento. O fogo deve ser baixo, para que a água não inicie sua fervura rapidamente e, deste modo, o vapor circulante não aqueça o sensor, mascarando o resultado.

Não demora muito até que o tiosulfato comece a se fundir (aprox. em $t=4$ min, para $T=48^{\circ}\text{C}$). Quando se perceber que a fusão está completa (aprox. $t=7$ min), deve-se aguardar mais alguns minutos para desligar o fogo (aprox. $t=22$ min). Pode-se, então, retirar a xícara do banho Maria para que o tiosulfato resfrie à temperatura ambiente, de forma satisfatoriamente lenta, conforme se vê.

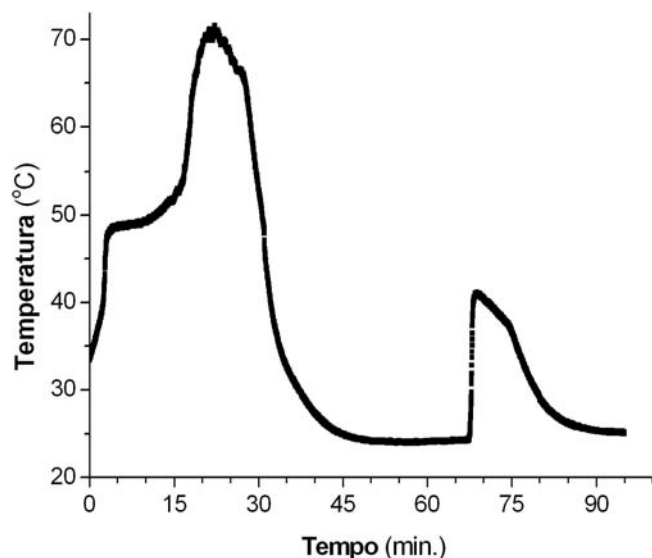


Figura 64: Superresfriamento do tiosulfato de sódio

O resfriamento completo leva mais de 20 minutos, quando o equilíbrio térmico a cerca de 24°C é alcançado. Entretanto, observamos que não houve solidificação parcial nem completa do tiosulfato, mesmo tendo a temperatura caído muito abaixo do ponto de fusão (cerca de 48°C , de acordo com o gráfico). Assim, dizemos que a substância foi superresfriada.

Um fato relevante acontece quando, em $t=67$ min, damos uma pancada sobre a mesa com o fundo da xícara, produzindo assim uma grande perturbação ao sistema superresfriado. A partir deste exato instante, durante uns 4 ou 5 segundos, observa-se uma cristalização gradual do líquido de volta ao estado sólido original. Neste momento, o sensor registra um salto na temperatura da substância, que salta bruscamente de 24°C para 42°C . Este aumento de temperatura vem da liberação do calor latente de fusão do

tiosulfato de sódio. Nos minutos seguintes, podemos observar o resfriamento da substância de volta à temperatura ambiente.

A termodinâmica explica que o estado superresfriado é metaestável, isto é, um mínimo local de energia, e pode facilmente decair para um estado mais estável, de menor energia, em caso de perturbação. É exatamente o que se observa em $t=67$ min. A cristalização repentina também pode ocorrer caso a substância seja resfriada muito abaixo do ponto de fusão.

Experimento 12: O efeito M'pemba.

Se prepararmos, em recipientes idênticos, duas amostras com a *mesma quantidade* de água, mas *temperaturas diferentes*, sendo uma morna e a outra quase fervendo, e levamos ambas ao congelador, simultaneamente, qual congelará primeiro?

O senso comum dirá que congela primeiro aquela que se encontra, inicialmente, mais fria, ou seja, a uma temperatura mais próxima do ponto de fusão. Mesmo entre físicos pós-graduados e professores a resposta costuma ser a mesma. Para investigar essa questão, e aproveitando nosso termômetro, realizamos esse experimento.



Figura 65: Sensores S1 e S2 (da esq. p/ dir.) posicionados nas duas amostras de água

Utilizamos simultaneamente dois sensores com termistores de $10\text{ k}\Omega$, um em cada amostra de água. Embora esses termistores não sejam próprios para temperaturas muito acima de 30°C (vide curva característica que obtivemos na calibração), sua utilização

não compromete o resultado do experimento uma vez que estamos mais interessados na faixa inferior de temperatura do gráfico (abaixo de 5°C), onde o termistor é bem sensível e de exatidão satisfatória. Contudo, a incapacidade do termistor de 10 k Ω para medição de altas temperaturas pode ser confirmada nos primeiros segundos do experimento, em que o sensor registra temperaturas próximas de 60°C para a amostra de água que estava quase fervendo. Segundo um termômetro digital de conferência, as temperaturas iniciais de cada amostra eram 40°C e 85°C.

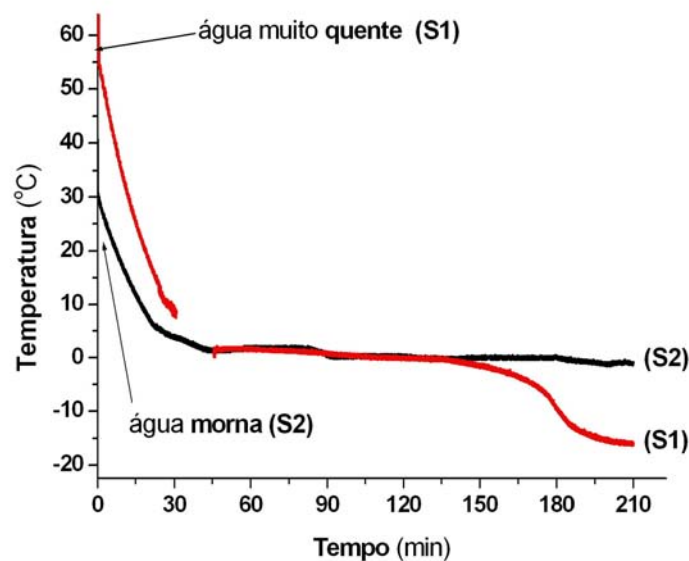


Figura 66: Efeito M'pemba

Vamos agora ao resultado do experimento: a água inicialmente mais quente, de fato, congela primeiro! Este é, sem dúvida, um fato surpreendente. Na verdade, uma leitura mais detalhada do gráfico revela que ambas as amostras iniciam o processo de solidificação em instantes próximos, mas a conclusão do congelamento se dá primeiro para a água inicialmente mais quente.

Este fenômeno foi descoberto por acidente por Erasto M'pemba em 1969, na ocasião estudante de física da Tanzânia, ao fazer sorvetes. Na ocasião, M'pemba preferiu levar ao congelador a forma de gelo com leite ainda quente, com objetivo de utilizar a última forma de gelo ainda disponível antes de outro colega. No mesmo ano a revista inglesa *Physics Education* publicou um artigo sobre o fenômeno, batizado Efeito M'pemba, e nas décadas seguintes outros físicos refizeram o experimento encontrando exatamente o mesmo resultado [5].

A física do efeito M'pemba não é simples, pois há vários fatores em jogo que, se desprezados, levam à conclusão errada de que a água mais fria congela primeiro. Na verdade, o que acontece é que o resfriamento não é completamente newtoniano (como o resfriamento do café numa xícara). Existem alguns efeitos adicionais importantes, além dos considerados por Newton, que contribuem para o congelamento precoce da água mais quente de forma decisiva.

Em primeiro lugar a evaporação da água quente, muito maior que a da água morna, além de reduzir sensivelmente sua massa inicial (até 16%, segundo [5]), acelera a troca de calor com o congelador.

Outro fator relevante é o efeito de convecção. No caso da água quente a superfície resfria rapidamente devido à evaporação e esta camada mais fria e mais densa recém-formada tende a descer, criando uma corrente de convecção. Deste modo, ocorre uma troca de calor mais efetiva entre toda a massa de água, acelerando o congelamento total. Embora a superfície da água inicialmente mais fria provavelmente congele primeiro, em função do contato direto com o ar frio do congelador e por estar a uma temperatura bem mais próxima de 0°, tal congelamento cria apenas uma fina camada de gelo que atua como isolante térmico. Sendo assim, torna-se mais difícil a troca de calor entre a água abaixo desta camada de gelo e o congelador, e então a solidificação total desta amostra é mais lenta que a outra.

Existem ainda outros efeitos que não comentamos, uma vez que não pretendemos esgotar o assunto. Diversas referências, entretanto, podem ser encontradas sobre esse tema na internet com objetivo de aprofundar a compreensão deste fenômeno.

O aspecto paradoxal do efeito M'pemba advém principalmente do fato de comumente negligenciarmos uma tal complexidade de variáveis e assumirmos como um dado uma série de pressupostos e modelos simplificados que, quando analisados cuidadosamente, revelam-se difíceis de serem sustentados, como o caso de imaginarmos, a priori, que o resfriamento seria rigorosamente newtoniano.

CAPÍTULO 4

APLICAÇÃO DO PROJETO NO CAp-UFRJ

A construção e aplicação do termômetro no ensino médio do CAp-UFRJ, na verdade, é precursor deste Projeto de Instrumentação. Em 2005, quando eu era Licenciando e fazia minha prática de ensino na escola, tive como professor regente e orientador Beto Pimentel. Em agosto, convidamos Carlos Eduardo Aguiar, professor do IF-UFRJ, para sugestão um de trabalho de grupo para o quarto bimestre, cujo tema seria física térmica. Carlos apresentou-nos um trabalho de graduação de estudantes da UFRGS [2], em que haviam construído um termômetro utilizando termistores e a porta de jogos do computador, e também seu artigo com Francisco Laudares [1], sobre a utilização do computador como instrumento de pesquisa em geral.

Nesta conversa foi decidido construir um protótipo de termômetro nos moldes daquele construído em [2]. Após muitos testes, caso tudo funcionasse conforme esperado, seria proposto como atividade para os alunos da segunda série do CAp, no quarto bimestre, a construção desse termômetro e sua aplicação em projeto de pesquisa, sob orientação dos três idealizadores: Carlos Eduardo, Beto (professor da escola) e Bernardo (licenciando responsável). Embora a idéia inicial fosse o desenvolvimento imediato desta atividade de grupo na escola, a possibilidade de realização de experimentos interessantes em física foi vislumbrada pelo trio como possibilidade de extensão do trabalho no CAp-UFRJ para o desenvolvimento de um Projeto de Instrumentação, como este aqui.

Uma das grandes peculiaridades de Beto, professor regente, era a forma de avaliação que propunha às suas turmas. Ao invés de aplicar pura e simplesmente uma avaliação teórica, escrita e individual a cada dois meses de aulas, era proposto aos alunos também um trabalho de grupo, experimental, a ser desenvolvido ao longo de cada bimestre e entregue em forma de relatório científico. Esse trabalho respondia por 50% da nota bimestral e mantinha os alunos bastante ocupados também fora de sala de aula. Ao contrário do que pode parecer num primeiro instante, esse trabalho bimestral não tinha nenhum objetivo de aumentar notas ou facilitar a passagem de ano. Pelo contrário, os critérios de correção eram muito rigorosos e as notas dos alunos muitas vezes até mais

baixas que nas provas escritas individuais, de tal forma que boas notas nestes trabalhos estariam necessariamente vinculados a grandes esforços extra-classe.

Dentro desse estilo de trabalho de grupo experimental é que deveria ser também o trabalho do quarto bimestre, a ser coordenado pelo licenciando.

Aplicação do projeto como trabalho bimestral de grupo, em 2005

A tarefa dada aos alunos foi construir o termômetro que aqui descrevemos a partir de uma palestra inicial dada pelo Professor Carlos e mais duas semanas de oficina para montagem do equipamento sob orientação dos autores deste projeto. O objetivo da palestra era explicar o que seria o termômetro, mostrar suas vantagens e também fornecer subsídio teórico em relação ao funcionamento do mesmo. Em outras palavras, buscamos dar aos alunos noções prévias de condutividade elétrica, comportamento dos termistores, funcionamento dos joysticks, aquisição de dados com o computador, além de apresentar aos mesmos, em linhas gerais, o plano de trabalho a eles proposto. O plano de trabalho, por sua vez, era o seguinte:

- Entrega do termômetro totalmente operacional (acompanhado de um material escrito descrevendo os princípios de funcionamento do mesmo e um roteiro de montagem);
- Calibração do termômetro (entrega dos dados e do roteiro de calibração, além da discussão do conceito físico de calibração);
- Realização de um trabalho científico livre, com medida de temperatura através do termômetro construído, e entrega dos resultados finais.

Os trabalhos foram feitos por dezessete grupos entre quatro e cinco estudantes, num total de mais de 80 alunos envolvidos em três turmas de segunda série. Para cada etapa lhes foi dado um prazo de duas semanas e uma nota parcial de avaliação. No final, como em todos os bimestres, o trabalho de grupo desenvolvido corresponderia a 50% da nota do quarto e último bimestre.

O desenvolvimento do projeto

Embora a palestra do Professor Carlos tenha sido realizada fora do horário de aula normal, necessitando de autorização por escrito dos responsáveis legais, contou com presença de praticamente 100% do corpo discente da segunda série. Além disso, a participação dos estudantes ao longo de quase duas horas de exposição oral foi positivamente surpreendente: muitos fizeram perguntas, outros permaneceram após a palestra pedindo sugestões de projetos de pesquisa, etc.

Construindo o termômetro com os alunos

As oficinas, etapa imediatamente seguinte à palestra, consistiram em algumas tardes de atendimento aos alunos na própria escola (divididas em duas semanas consecutivas à palestra), dentro do clube de ciências, e tinham como objetivo auxiliar os estudantes no que dizia respeito à “mão-na-massa” do projeto: desencapamento de fios, realização de pequenas soldas elétricas, testes com o multímetro e, por fim, o teste final, que era plugar o dispositivo no PC e avaliar sua funcionalidade, dentre outras dúvidas diversas que surgiam durante este processo.



Figura 67: Oficina de montagem do termômetro para os alunos do CAp-UFRJ

O grande papel destas oficinas, entretanto, não era só fazer o termômetro de cada grupo funcionar; muito mais do que isso, procurou-se capacitar os alunos a desenvolverem sozinhos aquela etapa de montagem, o que de fato ocorreu para uma boa parte dos grupos. A maior prova disto é que alguns desses alunos (aqueles que concluíram sua

montagem pioneiramente) auxiliaram a nossa equipe (Bernardo, Beto e Carlos) nas oficinas com os demais estudantes (que ainda não haviam concluído a montagem).

Ao final das duas semanas reservadas para montagem do equipamento com tutoria presencial da equipe, 15 dos 17 grupos haviam conseguido construir um termômetro digital perfeitamente operacional. Os dois grupos remanescentes precisaram de mais uma semana.

Calibração dos termômetros dos alunos

Antes da realização da etapa seguinte, a calibração do termômetro, foi dada uma aula a respeito, discutindo conceitos como por que calibrar e os tipos de calibração (primária e secundária). Além disso, foi apresentado todo o conteúdo aqui descrito no capítulo de calibração, incluindo os aspectos matemáticos e a utilização do computador como ferramenta de aquisição e tratamento de dados via Microsoft Excel ou planilha similar. Em especial, uma única dificuldade significativa foi encontrada e superada: as funções matemáticas envolvidas no processo de análise de dados (transformação de resistência em temperatura e vice-versa), de forma a fortalecer ainda mais a idéia de interdisciplinaridade.



Figura 68: **Alunos utilizando um multímetro**

Para a realização da última etapa, que consistia num experimento pensado pelos próprios alunos dentro de seus grupos, o principal problema foi exatamente a necessidade de idealizar o próprio experimento. Entretanto, tentou-se contornar esta

difículdade inicial indicando a eles leituras suplementares em páginas na internet ou mesmo sugerindo experimentos mais simples.

Resultados da aplicação do trabalho no CAP-UFRJ em 2005

Muitos dos objetivos didáticos iniciais de implementação deste trabalho foram alcançadas já em sua primeira edição. Entre estes, destacamos o desenvolvimento de uma postura investigativa por parte dos alunos (que precisavam propor um experimento para eles próprios realizarem), os esclarecimentos sobre física térmica e funções matemáticas obtidos durante o trabalho, o envolvimento social do grupo como consequência das reuniões do trabalho, a realização de uma atividade experimental e extra classe, etc.



Figura 69: Foto explicativa tirada por um dos grupos

Entretanto, os resultados específicos de física térmica obtidos com os projetos propostos pelos alunos, de uma forma geral, não atenderam às nossas expectativas iniciais. Esperávamos como propostas de projeto de pesquisa por parte dos alunos temas com conteúdo científico relacionado à disciplina e, muitas vezes, estes estavam associados a procedimentos experimentais e/ou análise de dados não tão simples.

Analisando o ocorrido, concluímos que o principal motivo para essa correspondência incompleta às nossas expectativas foi a falta de infra-estrutura e de tempo hábil (apenas 6 semanas) que oferecemos aos alunos para realização de seus trabalhos (em todas as três etapas). Essa falta de infra-estrutura foi devida a muitos fatores: a dificuldade de se

encontrar termistores apropriados no comércio do Rio de Janeiro, problemas de acesso aos computadores (em casa e na escola), a falta de outros Licenciandos de Física que pudessem auxiliar os alunos nas oficinas de montagem e calibração, etc.

Algumas dessas dificuldades eram difíceis de se prever uma vez que estávamos aplicando o projeto pela primeira vez. Deste modo, aprendemos com as dificuldades e remodelamos a proposta de aplicação e desenvolvimento que seria aplicada no ano seguinte.

Reaplicação do projeto como trabalho bimestral de grupo, em 2006

Com objetivo de otimizar os resultados obtidos no ano anterior, em particular os resultados de física térmica dos trabalhos dos alunos, algumas modificações foram feitas no desenvolvimento e aplicação do trabalho com os alunos. A primeira foi estender sua duração para dois bimestres. Sendo assim, no terceiro bimestre o objetivo era a construção, calibração do Data-MAP, e ainda reprodução de um experimento padrão, comum a todos os grupos, de resultado conhecido, proposto pelo professor. Desse modo podíamos comparar os resultados entre grupos e também com o próprio padrão. No quarto bimestre o objetivo e tarefa era aplicar o termômetro em um projeto de pesquisa de tema livre, diferente para cada grupo, mas relacionado à física térmica.

O segundo cuidado foi utilizar os muitos licenciandos de física e alguns alunos voluntários da terceira série (que montaram o termômetro em 2005) como monitores para dar suporte aos grupos, desde a montagem até a proposição de um experimento de pesquisa, de modo que cada grupo tinha um monitor específico responsável que acompanhava a evolução do processo de perto.

Outra melhoria foi garantir o acesso dos alunos a computadores e termistores, ferramentas indispensáveis ao trabalho. Para isso, encomendamos (de um fornecedor na internet www.add-therm.com.br) e testamos previamente quantidade suficiente de termistores de diversos valores (10 k Ω , 30 k Ω , 100 k Ω e 150 k Ω) para todos os grupos. Além disso, fomos beneficiados com a aquisição de novos computadores para a sala de informática da escola, alguns dos quais foram especificamente reservados para a realização do trabalho de Física.

Resultados da aplicação do trabalho no CAP-UFRJ em 2006

Em função do aumento do tempo disponível para realização do trabalho e da melhoria da infra-estrutura oferecida, o desenvolvimento da atividade ao longo do terceiro e quarto bimestre se deu de modo mais suave. Além disso, os resultados finais dos alunos foram perceptivelmente mais interessantes e consistentes.

Em particular, dois trabalhos chamaram nossa atenção pelo conteúdo científico e qualidade dos resultados. Esses trabalhos foram compactados e os resultados interessantes são apresentados e descritos a seguir.

CAPÍTULO 5

EXPERIMENTOS PROPOSTOS PELOS ALUNOS DO CAp-UFRJ

Experimento A-1: Elevador de feijão: transformação de energia mecânica em energia térmica.

Título original: Verificação experimental da relação entre a variação de temperatura e peso exercido sobre um corpo.

Autores: Gabriel, Fábio, Lucas Djahjah, Luiz Felipe e Renato (alunos da 2ª série do Ensino médio do CAp-UFRJ, 2006. Professor Beto Pimentel).

O objetivo do experimento é verificar a transformação da energia mecânica de um corpo abandonado em queda quase livre em energia térmica, traduzida pelo aumento da temperatura de um corpo de prova, onde localiza-se nosso termômetro Data-MAP. Para realização do experimento são necessários sacos de feijão (utilizados como pesos), um elevador (para guiar a queda dos pesos, conforme a ilustração), argila (para absorção do impacto de queda) e o Data-MAP, com um sensor de 100 k Ω .



Figura 70:
Montagem experimental do elevador de feijão

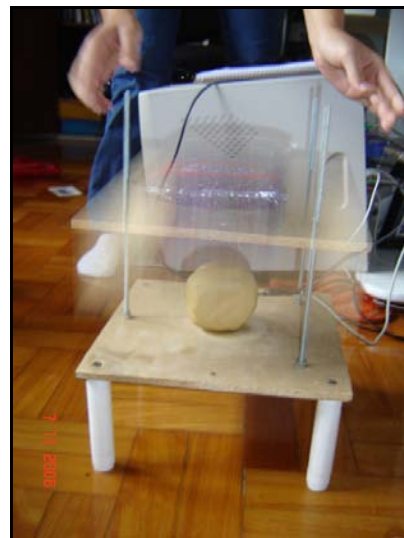


Figura 71:
Experimento em ação: a queda do feijão

Deve-se preparar uma bola de argila macia o suficiente para se deformar no impacto do elevador e absorver energia, mas rígida o suficiente para não comprometer o

funcionamento do termistor (que deve estar no centro da bola de massa) ao longo do experimento. Depois de montado o elevador, deve-se carregar sobre o elevador, primeiramente, um saco de feijão de 1,0 kg e deixá-lo cair sobre a bola de argila com o termômetro já ligado e medindo a temperatura. Em seguida, repete-se o processo de queda para 2, 3, 4 e 5 sacos de feijão de 1,0 kg, respectivamente.

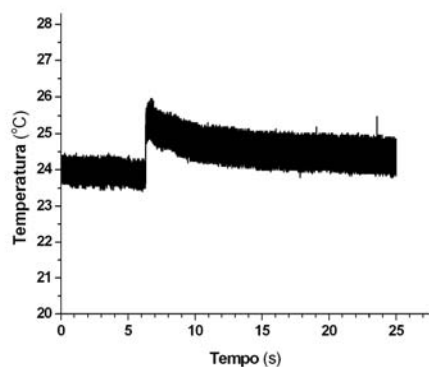


Figura 72: 1 saco de 1 kg

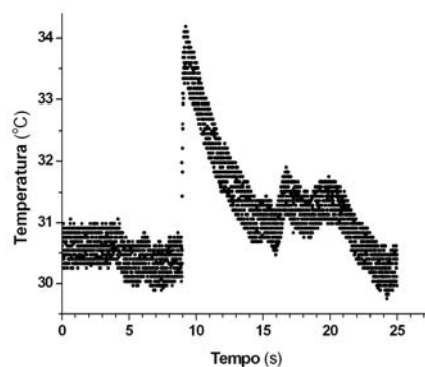


Figura 73: 2 sacos de 1 kg

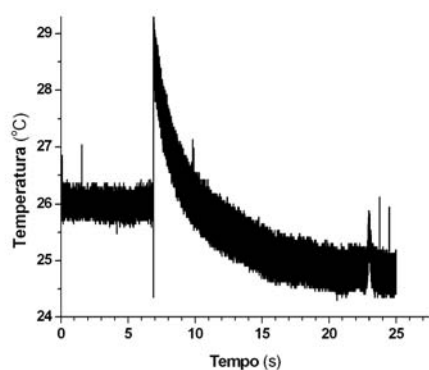


Figura 74: 3 sacos de 1 kg

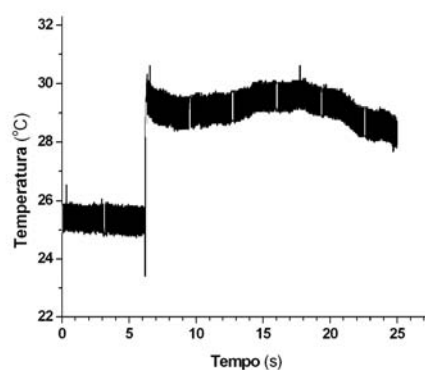


Figura 75: 4 sacos de 1 kg

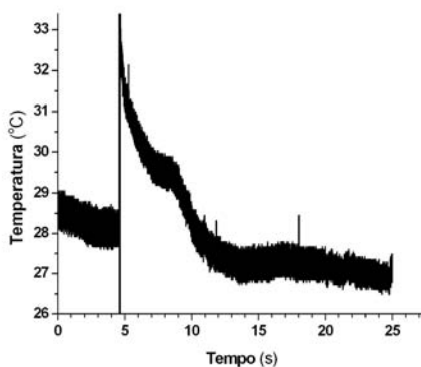


Figura 76: 5 sacos de 1 kg

O que observamos é que a variação de temperatura (imediatamente antes e depois da queda) é proporcional ao peso aplicado sobre o elevador com sacos de feijão. O resultado é coerente com a teoria: a energia potencial inicial do sistema (elevador com sacos de feijão ainda no alto) é convertida em cinética ao longo da queda e amassa a bola de argila no impacto, que cessa o movimento do elevador, mas agita termicamente as moléculas da argila, aumentando a sua temperatura.

“Pesos” utilizados (kg)	Temperatura antes da queda (°C)	Temperatura logo depois da queda (°C)	Diferença de temperatura (°C)
1,0 kg	24,0	24,9	0,9
2,0 kg	30,7	33,5	2,8
3,0 kg	26,0	29,0	3,0
4,0 kg	25,5	29,5	4,0
5,0 kg	28,5	33,0	4,5

Tabela 2: Temperatura da bola de argila

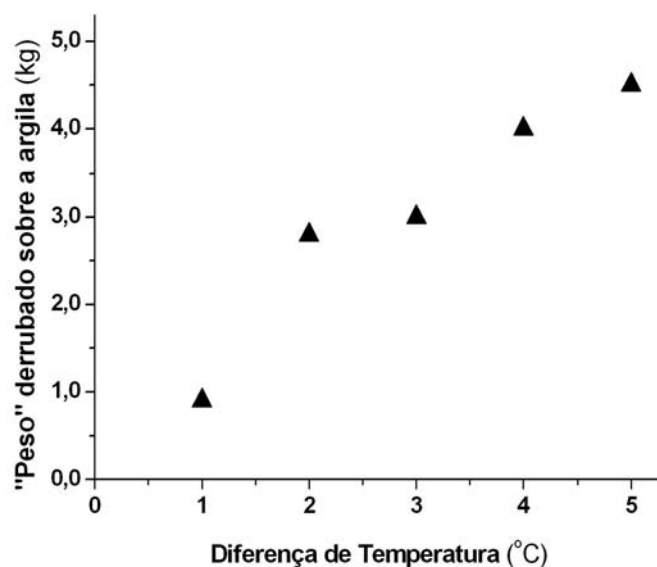


Figura 77: Energia potencial (“peso” derrubado) transformada em temperatura

O experimento pode ser explorado do ponto de vista do conceito global de conservação geral da energia, tão importante na física. Uma sugestão, neste caso, seria manter a variável peso constante (mesma quantidade de sacos de feijão) e variar a altura de queda. Deve-se apenas tomar cuidado na determinação da altura de queda real, que deve considerar o centro de massa da carga. Pode-se ainda aproveitar para reabordar o conceito de temperatura.

Experimento A-2: A temperatura corporal e a frequência cardíaca

Título original: Comparação entre o aumento da temperatura corporal e da frequência cardíaca.

Autores: Fernanda Luz, Marina de Abreu e Raíza de Oliveira (alunos da 2ª série do Ensino médio do CAP-UFRJ, 2006. Professor Beto Pimentel).



Figura 78: Autores do trabalho com o Professor de Educação Física do CAP-UFRJ

O objetivo do trabalho foi comparar o crescimento da frequência cardíaca, relacionado à realização de atividades físicas, com o aumento da temperatura corporal do indivíduo praticante. Depois, são comparados os resultados de dois indivíduos diferentes (*Pessoa 1* e *Pessoa 2*), com diferentes massas corpóreas. Com auxílio do professor de Educação Física do CAP-UFRJ, Marcus, foi proposto uma série de 5 exercícios e mais dois momentos de repouso, um inicial e outro final. Deste modo, temos 7 intervalos de medida experimental, num total de 30 minutos:

1. Indivíduo parado em pé (10 minutos);
2. Indivíduo andando rápido (2 minutos);
3. Indivíduo trotando (2 minutos);
4. Indivíduo dando pulinhos na lateral (3 minutos);
5. Indivíduo subindo e descendo de uma cadeira, alternando os pés (3 minutos);
6. Indivíduo andando devagar (5 minutos);
7. Indivíduo parado em pé (5 minutos).

A realização do experimento pressupõe a utilização de um frequencímetro para monitoramento dos batimentos cardíacos. Essa medida pode ser tomada (por outra pessoa que não seja a mesma que se submete ao exercício) a cada 20 ou 30 segundos.

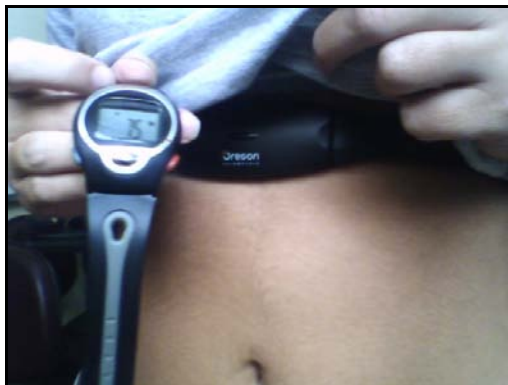


Figura 79: Frequencímetro em ação

Seguem os resultados encontrados pelos alunos:

	“Peso”	Altura	Idade	IMC*	
Pessoa 1	68 kg	1,79	17 anos	21,2 kg/m ²	<i>Peso normal</i>
Pessoa 2	49 kg	1,55	16 anos	17,9 kg/m ²	<i>Peso normal</i>

Tabela 3: Pessoas submetidas ao experimento

*IMC = Índice de massa corporal

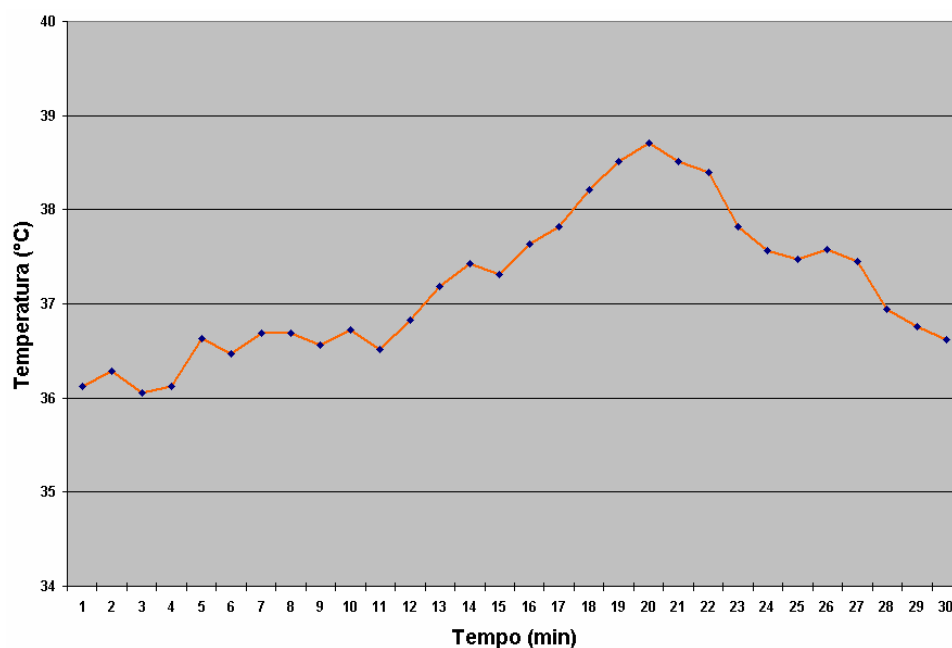


Figura 80: Temperatura vs. tempo para Pessoa 1 (17 anos, 1,79 m, 68 kg)

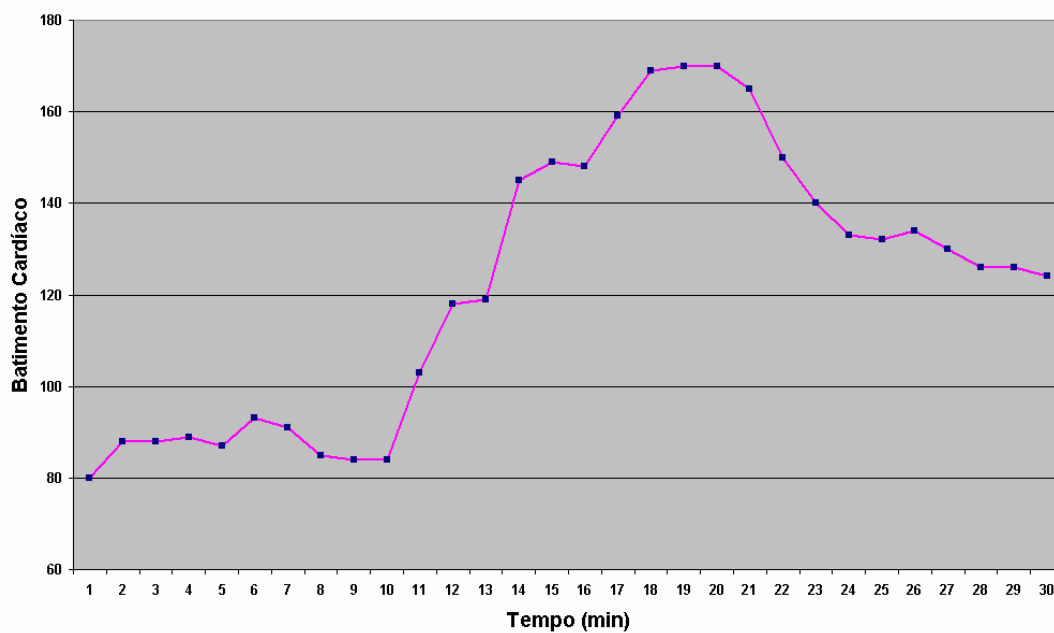


Figura 81: **Frequência cardíaca vs. tempo para Pessoa 1**

Os gráficos da *Pessoa 1* sugerem uma dependência aproximadamente linear entre frequência cardíaca e temperatura corporal num intervalo específico. Este intervalo é de aproximadamente 2°C (entre $36,5$ e $38,5^{\circ}\text{C}$) para temperatura, e entre aproximadamente 80 e 190 batimentos por minuto para frequência cardíaca. De forma semelhante é verificado para a *Pessoa 2*:

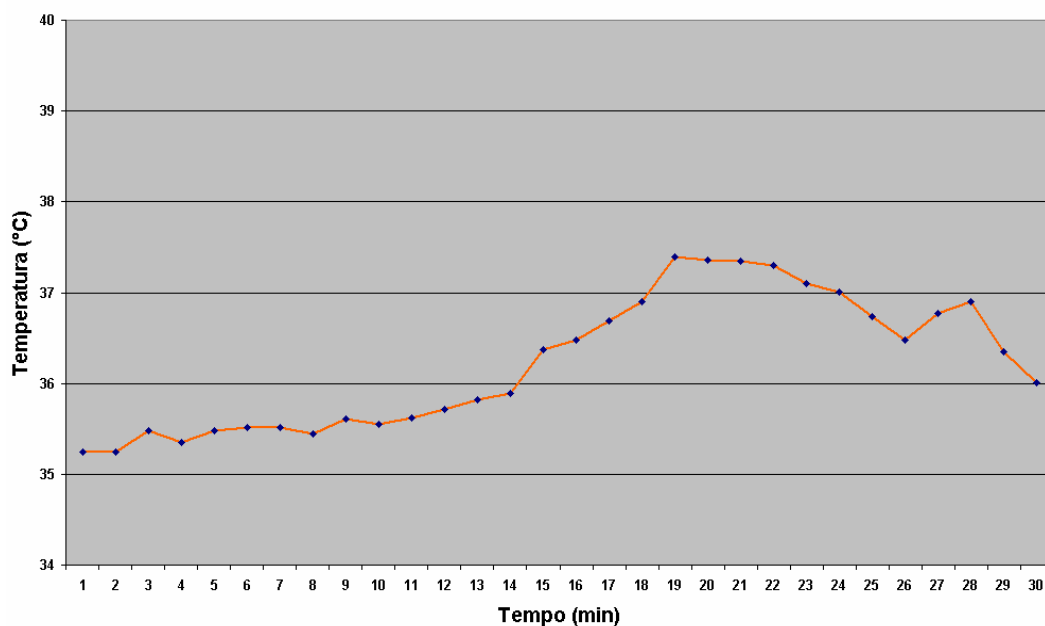


Figura 82: **Temperatura vs. tempo para Pessoa 2 (16 anos, 1,55m, 49 kg)**

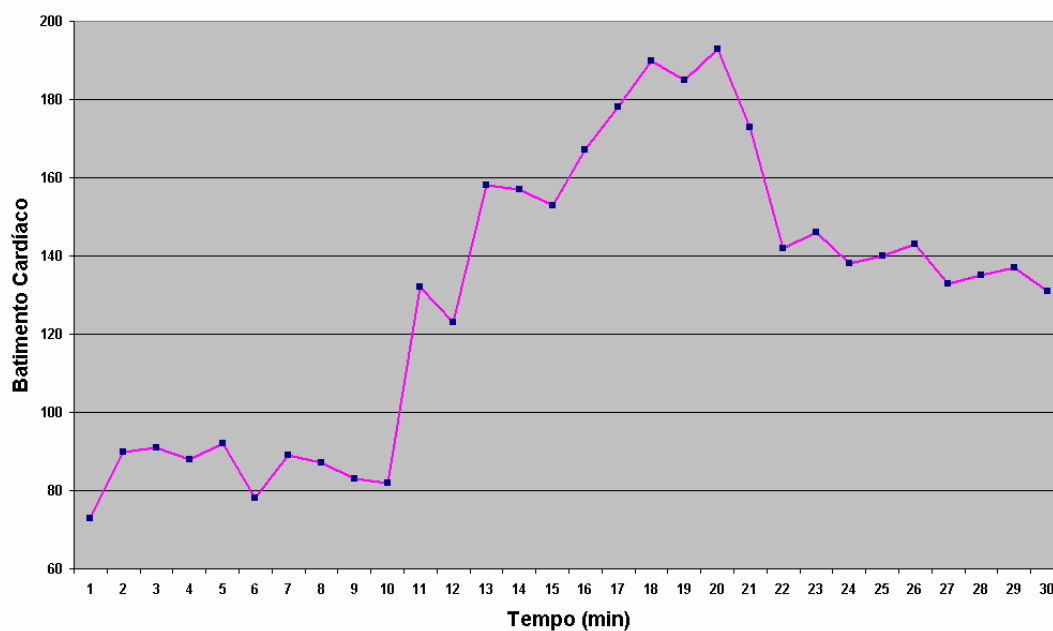


Figura 83: **Frequência cardíaca vs. tempo para Pessoa 2**

De posse de todos estes dados, comparamos a evolução temporal da temperatura com a evolução temporal da frequência cardíaca para os dois indivíduos.

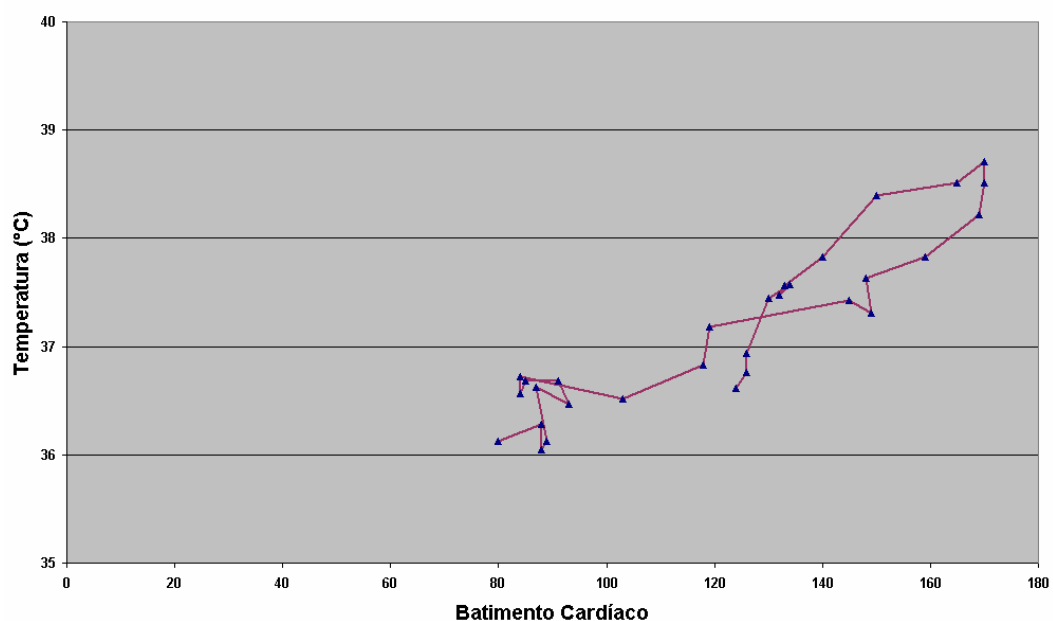


Figura 84: **Temperatura vs. frequência cardíaca para Pessoa 1**

A linha que une os pontos experimentais representa a passagem do tempo. Os últimos pontos experimentais, como se vêem, estão associados às duas últimas etapas (6 e 7) da série, quando se reduziu gradualmente o ritmo até a parada completa em $t=30$ min. Por

este motivo, a temperatura observada começa a reduzir, assim como a frequência cardíaca. De modo análogo se observa para a *Pessoa 2*:

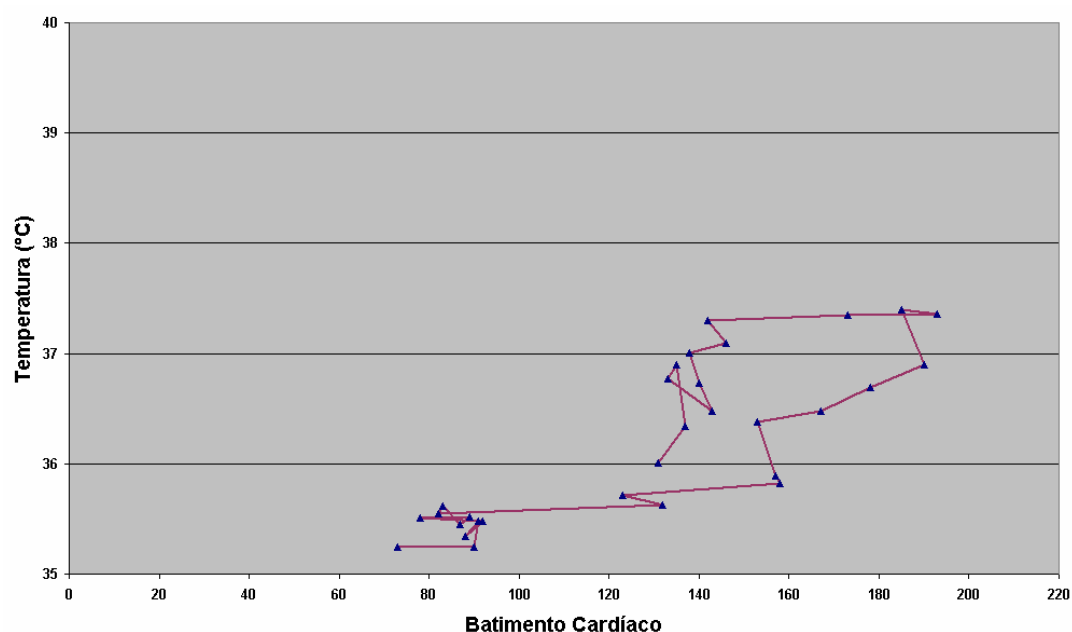


Figura 85: Temperatura vs. frequência cardíaca para Pessoa 2

Uma possibilidade de aprofundamento deste estudo é a sistematização da comparação entre indivíduos de grupos diferentes: por grupo de peso, idade, sexo, etc. Para este aprofundamento sugerimos o diálogo com o professor de educação física da escola, a exemplo de como foi feito por este grupo de alunos no CAP-UFRJ.

CONCLUSÃO

Tendo utilizado o *Data-MAP* para investigação de diversos fenômenos em física térmica e o tendo aplicado por dois anos letivos consecutivos como atividade didática em turmas do ensino médio, faremos aqui, etapa a etapa, um balanço de nosso trabalho.

A montagem do termômetro - o primeiro passo - não envolve maiores complicações e pôde ser desenvolvida num curto período de tempo quando proposta no ensino médio, necessitando apenas de alguns componentes simples e de baixo custo. Em particular, esta aplicação no CAP-UFRJ revelou-nos algumas dificuldades de execução que, uma vez já identificadas, foram evitadas de 2005 para 2006 e poder ser ainda minimizadas em futuras aplicações de caráter didático, conforme descrito nos *Capítulos 1 e 4*.

O processo de calibração - aqui proposto no *Capítulo 2* - realizado para o nosso protótipo é demasiado simples e, apesar de ter encontrado alguma resistência por parte dos alunos do ensino médio (quando da aplicação deste trabalho), permite estabelecer uma relação confiável entre resistência e temperatura a partir de medidas rápidas, com ou sem auxílio de um termômetro de comparação. Um posterior estudo aprofundado deste processo, feito no *Apêndice*, revelou como desnecessária a utilização de métodos mais detalhados e rigorosos de calibração, tendo em vista a finalidade essencialmente qualitativa e o caráter fundamentalmente didático de nossa aplicação experimental. De fato, os resultados do *Capítulo 3* confirmam a calibração efetuada como apropriada.

Quanto às possibilidades de utilização do termômetro, os resultados (*Capítulo 3*) obtidos aqui mostram que são diversas e poderosas. Eles trazem à tona uma série de situações cotidianas e intrigantes, muitas das quais não poderiam ser investigadas e tampouco estudadas com termômetros convencionais. Em particular, o *Data-MAP* revelou-se uma ferramenta eficaz para o acompanhamento da evolução temporal da temperatura em processos diversos. Na verdade, embora existam termômetros de capacidade de medição similar ao nosso no mundo da física experimental de alto nível, tais equipamentos tem custo elevadíssimo para que possam ser aplicados na maior parte das escolas públicas ou privadas.

Em função da complexidade dos resultados de alguns dos fenômenos investigados, optamos pelo não aprofundamento na discussão dos conceitos envolvidos. A justificativa por esta opção está no próprio objetivo do trabalho, já que uma análise detalhada de um único experimento aqui relatado já poderia render uma Monografia completa. Além disso, o abreviamento das discussões iniciadas pelos experimentos dos *Capítulos 3 e 5* visa ainda seduzir os leitores a dar continuidade a tais investigações como aplicação futura deste trabalho.

A aplicação do termômetro no CAp-UFRJ em 2005 e 2006 tornou possível a realização de atividades experimentais atualmente inexistentes na escola dentro do tema de física térmica. Mais do que isso, o envolvimento dos alunos também nos processos de montagem e calibração de seus próprios termômetros permitiu um conhecimento teórico sobre o funcionamento do instrumento. Esse conhecimento adicional provavelmente não teria sido alcançado se utilizássemos termômetros convencionais e já prontos.

A realização das atividades experimentais fora de sala de aula permitiu ampliar o tempo de contato do aluno com a física, mas sem comprometer o conteúdo programático estabelecido pela escola. Na última etapa do trabalho de grupo proposto aos alunos do CAp-UFRJ, foi permitido aos mesmos a criação de seu próprio experimento, de modo que cada grupo pôde se envolver num tema de seu próprio interesse, crescendo assim o gosto pela atividade.

Os resultados encontrados pelos alunos, especialmente os descritos no *Capítulo 5*, sugerem a possibilidade de sucesso de aplicação de trabalhos como este no ensino médio, não apenas no CAp-UFRJ. Mais do que isso, a o conteúdo físico de alguns resultados possibilita o bom aproveitamento do Data-MAP inclusive na universidade.

Trabalhos como este - que envolve atividades experimentais, extra classe, em grupo e dentro de um tema curricular da disciplina - têm o poder de alcançar discussões e conceitos difíceis ou mesmo desinteressantes quando abordados somente em sala de aula. Deste modo pode ser possível diminuir um pouco o desgosto da maioria pela ciência, sobretudo pela física, e ainda oferecer aos mais interessados – entre professores e alunos - uma poderosa ferramenta didática de investigação.

APÊNDICE

DETALHES DA CALIBRAÇÃO DO TERMÔMETRO

Calibração primária e cuidados gerais

Pode-se calibrar o termômetro tão logo seja constatada sua operacionalidade, conforme descrito no *capítulo 1*. Assim, basta escolher o método de calibração (primário, secundário ou misto) e reunir o aparato necessário. Entretanto, alguns cuidados devem ser tomados neste processo.

Na utilização da temperatura da água como temperatura conhecida, por exemplo, deve-se estar certificado que as pernas de metal do termistor estejam devidamente isoladas eletricamente, bem como em qualquer medida em que o termistor precise ser mergulhado em uma substância líquida.

No caso do ponto do gelo, além do cuidado de não provocar curto circuito, deve-se procurar introduzir o termistor no material em sua fase líquida, objetivando envolver todo seu corpo e criar um real equilíbrio térmico entre a água e o mesmo. Tal equilíbrio não parece ocorrer adequadamente se o termistor for somente encostado contra o material em sua fase sólida.

Em todos os casos, seja a calibração feita por processo primário, secundário ou misto, deve-se, como regra geral, analisar com cuidado os dados na tela do computador e aguardar o real equilíbrio térmico entre o termistor e seu envoltório. Esta conclusão estará associada a uma relativa estabilidade entre leituras consecutivas. Como recomendação, devido a dificuldade associada ao processo primário, recomendamos a utilização de um termômetro de comparação conforme descrito no *capítulo 2*.

Problemas na calibração

O processo de calibração adotado pressupõe uma dependência específica da resistência elétrica do termistor com a temperatura, mas diversos outros fatores também podem influir na sua resistência efetiva, não havendo como medir ou sequer ter conhecimento

sobre todos estes ruídos. Tais variações na resistência do termistor, de origem não-térmica, acabam sendo, no final, interpretadas como variações de temperatura devido ao nosso método de medição. Deste modo, é possível que, para uma mesma temperatura, por exemplo, a temperatura ambiente, um sensor registre leituras diferentes de resistência em momentos diferentes.

A melhor forma de reduzir essas flutuações é tomar alguns pequenos cuidados. Primeiramente, não se deve colocar e retirar o cabo extensor da porta de jogos a cada experimento, pois cada nova conexão pode modificar a impedância dos contatos. Outra dica é considerar que a tensão e a corrente elétrica criadas a partir do computador podem oscilar e, por isso, deve-se estar atento às condições de instalação, como a rede doméstica e o estabilizador de voltagem. A última recomendação, enfim, é a mais simples: ter extremo cuidado no manuseio do equipamento em função da fragilidade do termistor e dos contatos elétricos ou soldas.

Conferindo a validade de uma calibração específica

Para avaliar a confiabilidade de uma calibração específica, pode-se comparar as leituras do nosso termômetro experimental com um termômetro convencional, apropriado para a faixa de temperatura prevista. Outro procedimento possível é medir a mesma temperatura com sensores diferentes, preferencialmente de valores nominais distintos, e ao mesmo tempo. Após converter as leituras de resistência de cada termistor para valores de temperatura (através da função matemática e parâmetros característicos de cada termistor), espera-se como resultado valores bastante homogêneos de temperatura, levemente distintos apenas em função da incerteza experimental característica do processo.

Comparando calibrações sucessivas. Incerteza na temperatura.

Os termistores são unidades extremamente sensíveis, nas quais, como já foi analisado, a dependência matemática entre resistência elétrica e temperatura é do tipo exponencial. Deste modo, pequenas variações de temperatura podem causar grandes mudanças nos valores de resistência lidos pelo termistor, e vice-versa, dependendo da faixa de medição utilizada. Isto é, quando os termistores são expostos a temperaturas próximas

do limite inferior de sua faixa útil (vide gráficos de calibração deste apêndice) sua sensibilidade é altíssima e, portanto, uma pequena redução de temperatura faz a leitura de resistência no monitor decolar. Ao contrário, quando exposto a temperaturas mais elevadas, próximas do limite superior da faixa útil, sua sensibilidade cai bastante, de tal forma que grandes variações de temperatura pouco modificam a leitura de resistência no monitor.

Na tentativa de obter ainda uma calibração ainda mais confiável de nossos dispositivos, optamos por calibrar cada sensor segundo diferentes pares de temperaturas T_1 e T_2 , e assim montar tabelas conforme abaixo, para o caso do termistor de 100 k Ω :

		Calibração		
		#1	#2	#3
T_1	(°C)	22,2	14,8	27,3
$R(T_1)$	(u.a.)	41970	62034	25845
T_2	(°C)	67,5	50,5	83,2
$R(T_2)$	(u.a.)	8399	12220	5010
a	(u.a.)	0,235	0,025	0,745
b	(K)	3570	4237	3140

Tabela 4: Calibração do sensor de 100 k Ω para 3 pares diferentes de temperatura

A tabela mostra os valores para três calibrações distintas: 1, 2 e 3. Para comparar de modo definitivo as 3 calibrações, obtivemos um gráfico com as três curvas.

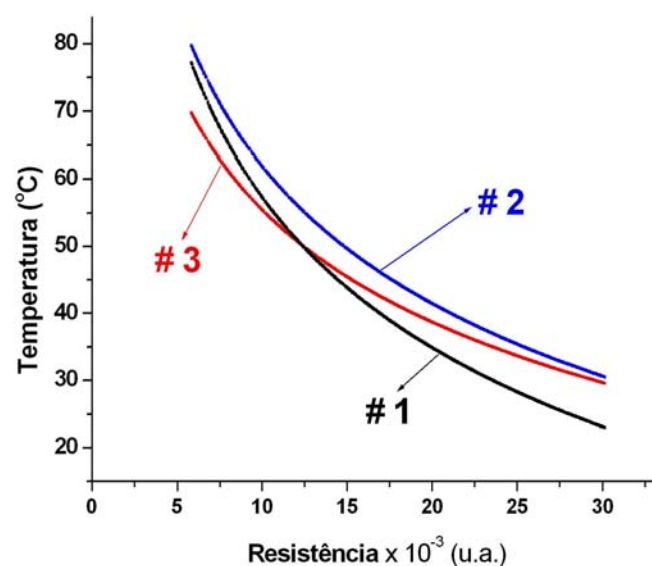


Figura 86: Calibrações distintas para o sensor de 100 k Ω

Através desta análise gráfica, percebemos que, apesar da aparente discrepância total entre os parâmetros **a** e **b** obtidos de cada uma das calibrações da tabela, as curvas se assemelham quando desenhadas no mesmo plano. Podemos considerar que as três curvas juntas no gráfico são equivalentes a uma única curva cuja linha fosse muito mais espessa, ou a uma curva média, de linha fina, então com uma barra de erro vertical grande. Em outras palavras, o valor de temperatura obtido a partir de uma leitura com nosso dispositivo, de acordo com este gráfico, tem incerteza próxima de 4°C ao longo de toda a faixa (metade da espessura média da linha).

Esta mesma análise foi feita para o termistores de 30Ω e de 10Ω.

		Calibração		
		#1	#2	#3
T_1	(°C)	3,6	39,7	22,2
$R(T_1)$	(u.a.)	24151	6776	12111
T_2	(°C)	22,2	3,6	12,5
$R(T_2)$	(u.a.)	12111	25151	17599
a	(u.a.)	0,42	0,40	0,30
b	(K)	3030	3045	3133

Tabela 5: Calibração do sensor de 30 kΩ para 3 pares diferentes de temperatura

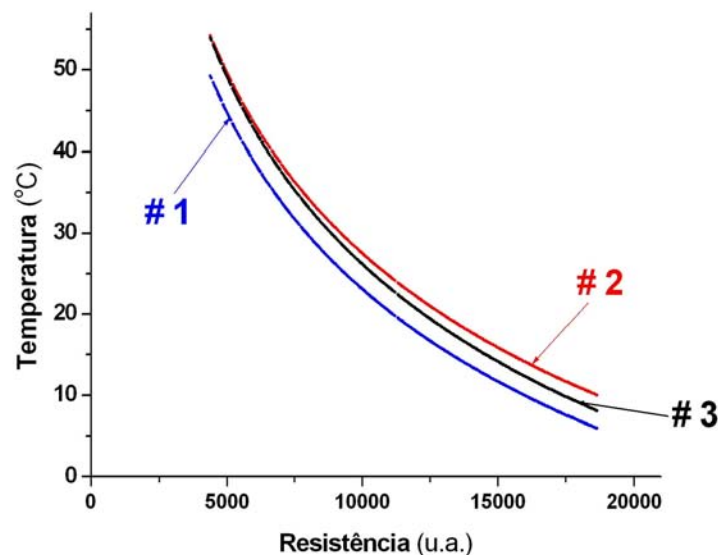


Figura 87: Calibrações distintas para o sensor de 30 kΩ

Segundo o gráfico, a incerteza para este sensor é de cerca de 3°C para temperaturas mais elevadas, e cerca de 2°C para temperaturas mais baixas. As temperaturas usadas para a

formação da tabela foram obtidas com uso de água aquecida ou resfriada, e registradas com um termômetro digital.

		Calibração		
		#1	#2	#3
T_1	(°C)	24,5	-15,8	8,0
$R(T_1)$	(u.a.)	4790	32380	10220
T_2	(°C)	8,0	24,5	-15,8
$R(T_2)$	(u.a.)	10220	4790	32380
a	(u.a.)	0,012	0,024	0,040
b	(K)	3839	3628	3502

Tabela 6: Calibração do sensor de 10 k Ω para 3 pares diferentes de temperatura

Para o último sensor, de 10 k Ω , percebemos uma coerência ainda maior entre as calibrações. Neste caso, a temperatura de 24,5°C era a temperatura ambiente registrada com um termômetro digital; a temperatura de 8,0°C era a temperatura interna da geladeira; a temperatura 15,8°C negativos era a temperatura interna do congelador. Todas foram obtidas com auxílio de um termômetro digital enquanto o sensor com o termistor realizava as leituras de resistência elétrica para cada temperatura.

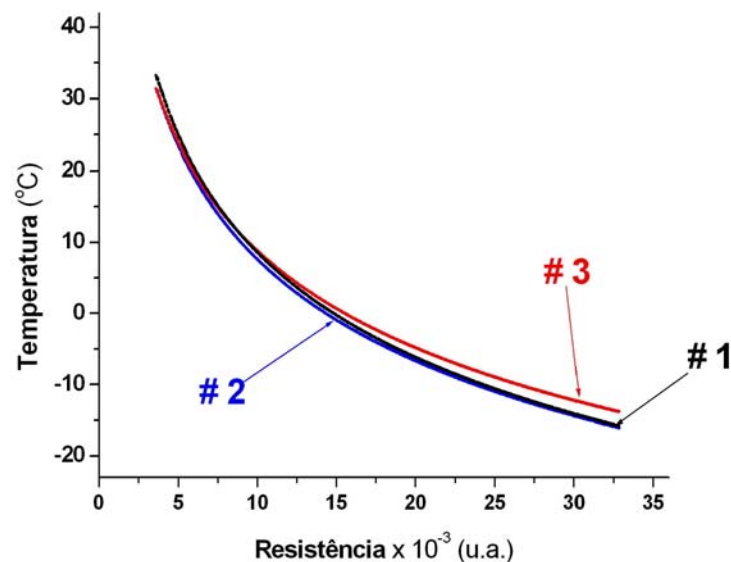


Figura 88: Calibrações distintas para o sensor de 10 k Ω

Uma análise do gráfico sugere uma incerteza próxima de 1°C para temperaturas mais altas e de até 2°C para temperaturas mais baixas. Portanto, o sensor preparado com o termistor de 10 k Ω é aquele que atinge maior exatidão em sua medida.

Calibrando com mais pontos experimentais

Embora o método de calibração até aqui sugerido seja o mais simples que imaginamos, era necessário estudar mais a fundo a confiabilidade de uma calibração experimental a partir de poucos pontos. Para isto, novamente usando um termômetro digital de comparação, optamos por obter as resistências lidas pelo sensor para várias temperaturas diferentes, em toda a faixa de medição esperada para o termistor. O método usado foi o mesmo descrito no capítulo de calibração, para verificação da linearidade. Abaixo seguem os dados para 8 pontos experimentais:

T (°C)	T (K)	1/T (K ⁻¹)	R	ln(R/1)
14,8	287,9	3,47 x 10 ⁻³	62034	11,04
22,2	295,3	3,39 x 10 ⁻³	41970	10,64
27,3	300,4	3,33 x 10 ⁻³	25845	10,16
38,0	311,1	3,21 x 10 ⁻³	19050	9,85
50,5	323,6	3,09 x 10 ⁻³	12220	9,41
59,5	332,6	3,01 x 10 ⁻³	9060	9,11
67,5	340,6	2,94 x 10 ⁻³	8399	9,04
83,2	356,3	2,81 x 10 ⁻³	5010	8,52

Tabela 7: Calibração detalhada para sensor de 100 kΩ

O gráfico a seguir mostra ajuste linear entre o logaritmo natural da resistência e o inverso da temperatura, conforme sugere equação (2):

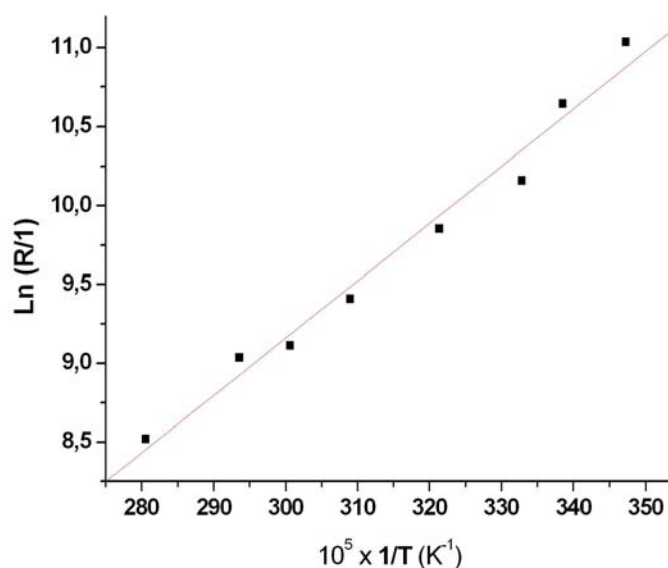


Figura 89: Dependência da resistência com a temperatura para o sensor de 100 kΩ

A partir do ajuste linear, obtivemos os parâmetros de calibração (***a***, ***b***), lembrando que o coeficiente linear do ajuste é ***ln a*** e o coeficiente angular é o próprio ***b***.

$$\mathbf{a = (0,18 \pm 0,12) \text{ u.a.}}$$

$$\mathbf{b = (3633 \pm 210) \text{ K}}$$

A incerteza em ***a*** é do tipo assimétrica, pois provém da incerteza em ***ln a***, mas foi aproximada para o seu valor médio, por simplicidade. Note que, apesar de grande a incerteza nos dois parâmetros, bem como seus valores máximos e mínimos são aproximadamente compatíveis com a calibração simplificada para o sensor de 100 k Ω , conforme a *tabela 2*. Como também já foi mostrado, por tratar-se de uma curva exponencial, mesmo para dois pares de parâmetros (***a***, ***b***) bem distintos é possível termos curvas similares.

Em outras palavras, é possível obter uma calibração confiável com apenas dois ou três pontos e fazendo uma interpolação entre as curvas obtidas. Além disso, é importante lembrarmos que o objetivo do trabalho não é o de construir um termômetro de leituras muito exatas e de grande repetitividade. Precisamos apenas de um instrumento sensível à temperatura que mostre como essa grandeza varia no tempo para uma série de fenômenos interessantes, conforme mostrado ao longo do trabalho, não sendo tão importante os valores absolutos entre os quais ocorrem estas variações.

Ajustando outras funções matemáticas

Haag-Oliveira-Veit [2] sugere uma expressão empírica para descrever o comportamento de um termistor tipo NTC numa faixa de temperaturas mais ampla, entre -50°C e +150°C, conhecida como equação de Steinhart-Hart. Ela é obtida a partir de técnicas matemáticas para ajuste de curvas de resistência por temperatura para estes termistores.

$$\frac{1}{T} = A + B \ln R + C \ln^3 R$$

Embora a exatidão prometida pelo uso desta equação seja da ordem de $\pm 0,01$ °C, consideramos, a priori, que seu manuseio seria totalmente inapropriado para o ensino

médio. E, mais do que isso, nossa tentativa posterior de utilização desta equação como parametrização para nossos dados experimentais revelou que ela não traz ganho efetivo na exatidão dos resultados finais. Isto acontece uma vez que a origem dos erros de medição que registramos não é de ordem estatística, mas sim de ordem sistemática, sendo fruto da precariedade da montagem experimental, que envolve contatos elétricos com soldas caseiras, instabilidade da tensão do computador e outros aspectos desconhecidos.

Sendo assim, encerramos aqui a discussão sobre a calibração do termômetro, tendo chegado à conclusão que o método de calibração simplificada, proposto inicialmente, é plenamente satisfatório para a utilização do termômetro no estudo de muitos fenômenos, seja com aplicação no ensino médio ou não. Portanto, embora tenhamos procurado métodos alternativos de calibração com o objetivo de encontrar melhores resultados, consideramos trabalhoso e desnecessário repetir os procedimentos já descritos e analisados neste apêndice para se obter medidas de variações de temperatura de interesse.

REFERÊNCIAS E LEITURAS COMPLEMENTARES

- [1] AGUIAR, Carlos. E., LAUDARES, Francisco, *Aquisição de dados usando Logo e a porta de jogos do PC*, Rev. Bras. Ens. Física, v.23, n.4, 2001.
- [2] HAAG, Rafael, OLIVEIRA, Leonardo M. e VEIT, Eliane A., *Coleta automática e interpretação de dados em um laboratório didático de termologia*, Textos de apoio ao Professor de Física, v.16 n.2, 2005.
- [3] SILVA, Lucia F. e VEIT, Eliane A., *O microcomputador como instrumento de medida no laboratório didático de Física*, Textos de apoio ao Professor de Física, v.16 n.2, 2005.
- [4] INMETRO, *Vocabulário internacional de termos fundamentais e gerais de metrologia*, 1995.
- [5] KNIGHT, C., *The Mpemba effect: the freezing times of hot and cold water*, Textos American Journal of Physics, v.64 n.5, 1996.
- [6] THE CONCORD CONSORTIUM, *Realizing the promise of educational technology*, <http://www.concord.org/work/> (26/11/2006).
- [7] LANG, Fernando da Silveira, *Transições de fase e experimentos com estados metaestáveis*, <http://omnis.if.ufrj.br/~carlos/cap/superaquecimentoLang.pdf>, (26/11/2006).

EPÍLOGO



(Tradução livre)

“Estou fortemente convencido
de que por trás de todo grande homem
existe um grande computador”

HARRIS, Sidney, *Science Cartoons plus*,
<http://www.sciencecartoonsplus.com/gallery.htm>
(em 26/11/2006)